



HAL
open science

Etude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observations de terrain

V. Koulinski

► **To cite this version:**

V. Koulinski. Etude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observations de terrain. Cemagref Editions, pp.538, 1994, Coll. Etudes du Cemagref, série Equipements pour l'eau et l'environnement, n°15, 2-85362-398-X. hal-02576370

HAL Id: hal-02576370

<https://hal.inrae.fr/hal-02576370v1>

Submitted on 24 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PUB00003175

n°15



Étude de la formation d'un lit torrentiel

Vincent Koulinski

Étude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observations de terrain

V. Koulinski



THÈSE

Présentée par Vincent Koulinski

Pour obtenir le titre de Docteur
de l'Université Joseph Fourier - Grenoble I

(Arrêtés ministériels du 5 juillet 1984 et du 23 novembre 1988)

Spécialité : mécanique

Étude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observations de terrain

Date de soutenance : 16 décembre 1993

Composition du jury

Président	M. Chollet
Rapporteurs	M. Jaeggi M. Pochat
Examineurs	M. Bois M. Léfort M. Meunier

Thèse en collaboration entre le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement), la division Protection contre les Érosions du CEMAGREF et SOGREAH.

Adresse actuelle de l'auteur : ETRM, 541 route de la Rosière, 73700 Bourg-Saint-Maurice

Les Études du CEMAGREF

Cette collection éditée des travaux scientifiques du CEMAGREF, thèses, comptes rendus de recherches regroupés en quatre séries qui correspondent aux quatre nouveaux départements scientifiques du CEMAGREF :

- **Gestion des milieux aquatiques** (anc. série *Ressources en eau*),
- **Équipements pour l'eau et l'environnement** (anc. séries *Hydraulique agricole*, *Gestion des services publics*),
- **Gestion des territoires** (anc. séries *Forêt*, *Montagne*, *Production et économie agricoles*),
- **Équipements agricoles et alimentaires** (anc. série *Équipement des IAA*).

Ces séries font suite aux publications ventilées en sept rubriques jusqu'à fin 1993.

■ Série Équipements pour l'eau et l'environnement

N°14 - *Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation* - 1994, 220 p. - **210 F.**

N°15 - *Étude de la formation d'un lit torrentiel* - 1994, 538 p. - **345 F.**

Études déjà parues :

Hydraulique agricole (anc. série)

N°3 - *Secteurs de référence drainage. Recueil des expérimentations* - 1988, classeur 20x26, 92 fiches - **150 F.**

N°4 - *Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA* - 1989, 334 p. - **250 F.**

N°5 - *Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement* - 1989, 322 p. - **250 F.**

N°6 - *Réseaux collectifs d'irrigation ramifiés sous pression. Calcul et fonctionnement* - 1989, 140 p. - **150 F.**

N°7 - *Géologie des barrages et des retenues de petites dimensions* - 1992, 144 p. - **200 F.**

N°8 - *Estimation de l'évapotranspiration par télédétection. Application au contrôle de l'irrigation* - 1990, 248 p. - **250 F.**

N°9 - *Hydraulique à l'interface sol/drain* - 1991, 336 p. - **250 F.**

N°10 - *Le fonctionnement du drainage : approche pédo-hydraulique* - 1991, 248 p. - **200 F.**

N°11 - *Mise en valeur des sols difficiles. Drainage et après-drainage des argiles vertes* - 1991, 140 p. - **150 F.**

N°12 - *Colmatage des drains et enrobages : état des connaissances et perspectives* - 1991, 152 p. - **200 F.**

N°13 - *Guide pour le diagnostic rapide des barrages anciens* - 1992, 100 p. - **150 F.**

Gestion des services publics (anc. série)

N°1 - *Économie et organisation à l'échelle départementale du financement du renouvellement des réseaux d'eau potable* - 1991, 76 p. - **150 F.**

Montagne (anc. série)

N°1 - *Éléments d'hydraulique torrentielle* - 1991, 280 p. - **300 F.**

N°2 - *Aspects socio-économiques de la gestion des risques naturels* - 1992, 152 p. - **150 F.**

N°3 - *Éléments de pastoralisme montagnard - Tome 1 : Végétation, équipements* - 1992, 168 p. - **200 F.**

N°5 - *Rhéologie des boues et laves torrentielles - Étude de dispersions et suspensions concentrées* - 1993, 416 p. - **400 F.**

**A commander au CEMAGREF - DICOVA,
BP 22, 92162 ANTONY Cedex - Tél. (1) 40 96 61 32 - Télécopie (1) 40 96 61 64
joindre votre paiement à la commande**

Le CEMAGREF est un établissement public de recherche sous la tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et du ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Ses équipes conçoivent des méthodes et des outils pour l'action publique en faveur de l'agriculture et de l'environnement. Leur maîtrise des sciences et techniques de l'ingénieur contribue à la mutation des activités liées à l'agriculture, à l'agro-alimentaire et à l'environnement.

La recherche du CEMAGREF concerne les **eaux continentales**, ainsi que les **milieux terrestres et l'agriculture**.

Elle permet d'élaborer des méthodes et des outils de **gestion intégrée** des milieux, de conception et d'exploitation d'**équipements**.

Les équipes qui rassemblent un millier de personnes réparties sur le territoire national, sont organisées en **quatre départements scientifiques** :

- **Gestion des milieux aquatiques**
- **Équipements pour l'eau et l'environnement**
- **Gestion des territoires**
- **Équipements agricoles et alimentaires**

En ce qui concerne le département *Équipements pour l'eau et l'environnement*, les programmes de recherche concernent principalement :

- l'optimisation des équipements et aménagements hydro-agricoles ;
- le développement de méthodes de surveillance et de prévention, et d'ouvrages de protection pour les risques liés aux avalanches, à l'érosion des terres, aux ruptures de barrages ;
- la gestion des services publics : optimisation des réseaux d'eau potable et des installations de déchets municipaux.



AVANT PROPOS

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement), la division Protection contre les Erosions du CEMAGREF et SOGREAH.

Il n'a pu être réalisé que grâce au financement d'une bourse doctorale attribuée par la Région Rhône Alpes. Qu'elle en soit ici remerciée.

Messieurs MEUNIER, BOIS et LEFORT ont assuré la direction de ce travail. Je les remercie vivement pour la rigueur de leurs conseils, pour l'esprit de synthèse dont ils ont fait preuve et pour l'expérience dont ils m'ont fait bénéficier.

Ce travail est l'aboutissement de cinq années passionnantes de découverte de l'hydraulique torrentielle pendant lesquelles Messieurs MEUNIER & BOIS m'ont guidé avec bienveillance. Je tiens à leur témoigner toute ma gratitude.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur CHOLLET, Professeur à l'INPG, pour le plaisir qu'il m'a fait en acceptant la Présidence de mon jury.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur JAEGGI (Laboratoire d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie - Institut fédéral de technologie - Zurich), de m'avoir fait l'honneur d'être rapporteur de ce travail et de me faire bénéficier ainsi des compétences acquises dans ce domaine.

Je suis particulièrement reconnaissant à Monsieur PCHAT (MTR - Département Recherche pour le Développement) d'avoir accepté d'être membre de mon jury et d'endosser la lourde tâche d'être rapporteur de ce travail.

C'est aussi grâce à monsieur LEFEBVRE, ingénieur de la société SOGREAH, que j'ai pu confronter mes points de vue et mes

observations. C'est avec une grande gentillesse qu'il m'a permis d'affermir mes hypothèses.

Merci à Cécile DUVERT, qui m'a aidé à réaliser mes essais en canal et qui a participé au traitement des données. Elle a permis aussi d'étendre le champ d'expérimentation de ces essais.

Merci à tous les membres de la division Protection contre les Erosions du CEMAGREF qui m'ont aidé et soutenu. J'espère que chacun se reconnaîtra, car je n'oserai citer personne de peur d'oublier quelqu'un.

Mais ce travail ne serait rien si je n'avais pas trouvé une aide attentive au laboratoire de SOGREAH en particulier auprès de Monsieur BIRRAUX.

Merci enfin aux membres des services de Restauration des Terrains en Montagne, qui m'ont conseillé et guidé lors de mes visites de terrain.

AVERTISSEMENT

Ce document est constitué des éléments suivants :

- Un résumé
- Un sommaire synthétique
- Un glossaire qui détaille le vocabulaire spécifique pour une telle étude
- Une table des symboles utilisés
- 8 chapitres (la table des matières est au début de chaque chapitre, la table des figures à la fin)
- Une bibliographie
- 4 annexes


Les caractères suivants ont été utilisées :

Noms propres,

NOMS D'AUTEURS,

Citations,

Renvois à une autre partie du texte pour complément.

Les mots repris dans le glossaire sont signalées par le signe : 

En espérant qu'ils facilitent la lecture de ce texte...

RESUME

Les lits torrentiels formés par des phénomènes de charriage présentent un aspect chaotique difficilement interprétable alors qu'ils témoignent du fonctionnement du torrent. Des expériences ont été conduites pour comprendre la formation du lit et le tri granulométrique qui peut entraîner un pavage de la surface.

1. Dans un premier temps, un modèle réduit de très petite taille a permis une quantification ponctuelle du charriage torrentiel et du tri granulométrique. Il est nécessaire de distinguer deux phénomènes :
 - **le charriage hyperconcentré**, relativement bien connu pour lequel le transport solide est essentiellement dominé par les conditions hydrauliques. Il correspond à l'approche la plus répandue du charriage torrentiel. Dans ce cas, le lit est relativement fin et régulier, l'écoulement est très rapide, la concentration en matériaux considérable. Le tri granulométrique - peu marqué - favorise le déplacement des gros éléments. Les interactions lit <=> écoulement sont si considérables qu'une connaissance fine de leurs caractéristiques est illusoire.
 - **Le charriage ordinaire - à proximité du seuil de début de transport** - est beaucoup moins bien connu. Dans ce cas, les éléments fins sont plus facilement déplacés, ce qui entraîne la formation d'un lit pavé. Il y a alors une grande variabilité du transport solide et le nombre de Froude de l'écoulement oscille autour de l'unité.

Le passage d'un type de charriage à un autre est nettement irréversible.

2. Une seconde étape, utilisant un canal assez large pour que la largeur du lit puisse s'adapter à l'écoulement, a montré que d'autres phénomènes s'ajoutent à ceux observés localement. Le caractère irréversible du basculement entre charriage hyperconcentré et charriage ordinaire entraîne une forte hétérogénéité spatiale des phénomènes, les deux types de transport solide étant présents simultanément mais en des sites distincts.

Le débit solide et la granulométrie des matériaux transportées - sur l'ensemble du modèle - sont notablement modifiés : les différentes structures morphologiques favorisent l'accueil des grains fins et grossiers, au détriment des éléments de taille intermédiaire qui sont transportés vers l'aval. Cependant, ce phénomène de tri est très dépendant du débit liquide et il favorise le mouvement des éléments fins lorsque l'on se rapproche du seuil de début de transport conduisant à un lit pavé dans des conditions proches de celles observées avec un canal étroit.

3. Une troisième étape, reproduisant l'ensemble d'une zone de dépôt soumise à une forte crue, a mis en évidence des structures morphologiques de taille très variables. Des "dunes à forte pente" liées à un charriage hyperconcentré localisé et à l'étendue granulométrique peuvent expliquer des élévations ponctuelles du lit de plusieurs mètres ainsi que la plupart des caractéristiques morphologiques observées.

4. Une quatrième étape, basée sur des mesures de terrain, a conduit à mettre au point une méthodologie de mesure des granulométries adaptée à la réalité torrentielle et à définir une méthode d'approche de la morphologie torrentielle. De plus, elle a permis, par confrontation avec les observations sur modèles, de mettre en lumière des tendances générales de fonctionnement des torrents, de définir une typologie des principales structures morphologiques et d'esquisser des hypothèses sur leur formation et leur rôle dans l'évolution du torrent. Enfin, elle facilite l'application au terrain de formules établies sur modèles réduits par une meilleure compréhension de la dynamique torrentielle.

SOMMAIRE

1 . INTRODUCTION - GENERALITES

1.1. Objectifs.....	31
1.2. Particularités des torrents.....	31
1.3. Lacunes des méthodes classiques d'approche d'un torrent.....	34
1.4. Définition du champ de cette étude.....	36
1.5. Outils disponibles.....	39
1.6. Méthodologie de l'étude.....	41
1.7. Conclusion.....	43

2 . ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Objectifs.....	48
2.2. Typologie des transports solides torrentiels.....	50
2.3. Conditions d'écoulement.....	61
2.4. Début de mouvement des particules.....	70
2.5. Capacité maximale de transport.....	79
2.6. Effet de la granulométrie étendue sur les phénomènes torrentiels - tri granulométrique.....	93
2.7. Morphologie.....	101
2.7.1. Notion de débit dominant.....	101
2.7.2. Différentes approches.....	103
2.7.3. Cas de l'approche de la puissance unitaire d'écoulement.....	107
2.7.4. Particularité des torrents.....	112
2.7.5. Profil en long.....	113
2.7.6. Dessin en plan du lit.....	115
2.7.7. Formes du lit.....	117
2.7.8. Les marches d'escaliers.....	123
2.7.9. Pavage.....	129
2.7.10. Synthèse.....	137
2.8. Liste des figures.....	141

3. METHODES DE MESURE

3.1. Introduction	146
3.2. Mesure de granulométrie.....	146
3.3. Mesures sur modèle réduit	172
3.4. Mesures de terrain.....	196
3.5. Liste des figures.....	202

4. EFFET LOCAL D'UN ECOULEMENT D'EAU CLAIRE SUR UN LIT DE GRANULOMETRIE ETENDUE

4.1. Introduction	208
4.2. Objectifs de ces essais.....	208
4.3. Protocole des essais	211
4.4. Observations expérimentales.....	215
4.5. Particularités de ces essais par rapport aux approches classiques.....	227
4.6. Paramètres d'étude de la mobilité des grains.....	251
4.7. Première phase : capacité limite de transport.....	258
4.8. Deuxième phase : transition vers le pavage	267
4.9. Troisième phase : lessivage du lit.....	278
4.10. Quatrième phase : dépavage.....	285
4.11. Conclusion.....	294
4.12. Liste des figures.....	296

5. PASSAGE D'UNE MODELISATION MONODIMENSIONNELLE A UNE APPROCHE BIDIMENSIONNELLE

5.1. Objectifs - Importance des expérimentations.....	303
5.2. Mode opératoire.....	305
5.3. Observations expérimentales des essais de formation du lit.....	313
5.4. Structures morphologiques élémentaires d'un lit pavé	325
5.5. Phase de dépavage du lit	329
5.6. Essais de formation du pavage avec recyclage	333
5.7. Conclusion.....	335
5.8. Liste des figures.....	336

6. ANALYSE DES EFFETS DES VARIATIONS TEMPORELLES ET DE L'APPORT AMONT DE MATERIAUX SUR UNE ZONE DE DEPOT

6.1. Objectifs	339
6.2. Mode opératoire.....	340
6.3. Observations expérimentales.....	354
6.4. Essais de pavage	369
6.5. Conclusion.....	374
6.6. Liste des figures.....	376

7. ANALYSE DE LA COMPLEXITE DES LITS NATURELS

7.1. Introduction	380
7.2. Approche morphologique préliminaire	385
7.3. Mesures réalisées dans le cadre de cette étude.....	389
7.4. Description sommaire des torrents retenus	395
7.4.1. Critère de sélection	395
7.4.2. Le St Vincent.....	396
7.4.3. La Béoux	398
7.4.4. Le Rabioux de Châteauroux.....	399
7.4.5. La Cerveyrette	400
7.4.6. L'Infènet.....	400
7.4.7. Le torrent de Bresson.....	401
7.4.8. La Malsanne	401
7.4.9. Le torrent de Bonnegarde.....	402
7.4.10. Le Torrent des glaciers	402
7.5. Résultats concernant les zones morphologiques	403
7.6. Résultat concernant les structures morphologiques.....	419
7.7. Hydrologie.....	437
7.8. Mesures dans le cadre d'une étude de cas	443
7.9. Conclusion.....	448
7.10. Liste des figures.....	452

8. CONCLUSION

8.1. Objectifs.....	457
8.2. Approche d'un lit torrentiel naturel.....	457
8.3. Dune à forte pente.....	460
8.4. Les phénomènes locaux	462
8.5. Influence des divagations.....	465
8.6. Méthode d'étude d'un lit torrentiel.....	467
8.7. Perspectives	469

ANNEXES

- I. Approche du tri granulométrique basée sur une formule de transport solide - Coefficient de masquage
- II. Ajustement suivant une loi à trois paramètres - Principales corrélations
- III. Calcul des conditions hydrauliques locales
- IV. Ebauche d'un modèle de tri granulométrique basé sur l'indice de mobilité relative

GLOSSAIRE


I. Objectifs

Il s'agit ici de donner une définition des principaux termes liés au charriage torrentiel. Comme on le verra au chapitre 2, il est possible d'observer en torrent des phénomènes très différents. En effet, la forte pente fournit une énergie considérable à l'écoulement et aux matériaux transportés permettant ainsi une vaste palette de processus.

Ce glossaire est donc destiné à apporter une définition précise des grandeurs considérées, un même terme correspondant à des phénomènes différents suivant les auteurs.

Cependant, le vocabulaire est extrêmement limité par rapport à la diversité des phénomènes et des structures que l'on rencontre dans les cours d'eau. Ainsi, il s'agit essentiellement ici d'une restriction de termes généraux au cas des torrents et des rivières torrentielles.

Par exemple, le terme de seuil correspond à la fois à des ouvrages de correction (très différents en rivière et en torrent) mais aussi à des structures liées à la dynamique des méandres dans les rivières à faible pente, à des affleurements rocheux ou à des structures morphologiques rencontrées en torrent. On ne retiendra ici que le terme lié à la dynamique torrentielle.

Les mots repris dans ce glossaire sont signalés par le signe : 

II. Définitions

BI STABILITE GRANULOMETRIQUE DU CHARRIAGE TORRENTIEL

Les expérimentations sur canal "ponctuel" ont montré que le transport solide évolue vers deux états stables :

- **Le charriage hyperconcentré** avec un lit constitué de matériaux plutôt fins. Dans ce cas, les éléments sont d'autant plus mobiles que leur diamètre est important (tant qu'il reste inférieur à la hauteur d'eau). Cependant, le débit solide étant très fort durant cette période, ce caractère est peu marqué. On peut considérer, en première approximation, que le tri granulométrique est très faible.
- **Le charriage ordinaire et le pavage du lit** correspondent à un tri granulométrique contraire au précédent : les matériaux sont d'autant plus mobiles qu'ils sont fins. Cette évolution correspond à un débit solide très faible. Il se produit dans ce cas un "charriage ordinaire".

Il est apparu que le passage d'un état à l'autre était nettement *irréversible*, la diminution de la taille des grains du lit entraînant un accroissement du transport solide, alors que l'augmentation de blocs dans le lit, conduit à un tarissement rapide de la fourniture en matériaux.

Ainsi, naturellement, le torrent se dirige vers deux états stables fondamentalement distincts.

CHARRIAGE

Il s'agit usuellement du transport de matériaux solides sur le fond d'un cours d'eau. Cependant, dans le cas des torrents, ce phénomène peut être dénaturé par les très fortes concentrations. On parle alors de charriage hyperconcentré^d.

CHARRIAGE HYPERCONCENTRE

Il s'agit des phénomènes particuliers qui se déroulent lorsque la concentration en matériaux transportés par charriage est telle que le transport solide a une influence notable sur les conditions d'écoulement. Le lit n'a alors plus aucune action *directe* sur le transport solide.

Il est nécessaire que la contrainte de cisaillement soit très supérieure à la valeur critique de début de mouvement des matériaux. Dans un tel cas, la concentration en matériaux est très bien expliquée par une formule sommaire du type :

$$C = 6.3 I^2$$

I pente du lit

C concentration en matériaux $C = \frac{Q_s}{Q}$

CHARRIAGE ORDINAIRE

Il s'agit du transport solide se produisant "ordinairement" dans un torrent lorsque les conditions hydrauliques sont trop peu vigoureuses pour permettre un charriage hyperconcentré. Dans ce cas on se trouve à proximité du seuil de début de mouvement et le tri granulométrique est important. Le lit est globalement stable et influence le transport solide (fourniture en matériaux, débit solide, granulométrie transportée...). Appliqué suffisamment longtemps sans apports amont importants, il conduit au pavage du lit.

Il se distingue du charriage partiel car il est capable de modifier notablement les éléments du lit, alors que ce dernier permet le transport d'éléments sans échanges avec les grains du lit.

CHARRIAGE TORRENTIEL

On désigne sous ce terme l'ensemble des phénomènes liés au charriage et se déroulant dans un torrent. On regroupe alors les phénomènes liés au charriage hyperconcentré^d mais aussi ceux correspondant au lessivage^d du lit.

CONDITIONS HYDRAULIQUES

Ce termes regroupe différents paramètres désignant les caractéristiques de l'écoulement (liquide). Il peut s'agir, par exemple, du couple débit liquide - pente, ou de façon plus précise de l'ensemble : largeur de la section mouillée, hauteur d'eau, vitesse d'écoulement, pente.

DUNE A FORTE PENTE

Il s'agit d'une structure morphologique formée de trois parties très différentes :

- **un chenal central constitué de matériaux fins.** La capacité de transport est telle que le lit fin, malgré une pente nettement réduite, permet un débit solide bien supérieur à la valeur moyenne de l'ensemble du lit. Dans cette partie, l'écoulement est très rapide, rectiligne et relativement étroit.
- **Une niche d'érosion régressive en amont.** La capacité de transport de la partie centrale entraîne un enfoncement très marqué du lit en amont.
- **Une zone de dépôt des éléments grossiers en aval.** Bien que le débit solide y soit considérable, la pente de la partie centrale est plus réduite : le lit s'élève peu à peu vers l'aval conduisant à un élargissement de la section mouillée. Cette divergence explique que la hauteur de l'écoulement devienne très inférieure au diamètre des éléments les plus gros. La pente de cette zone peut être beaucoup plus forte que sur l'ensemble du lit.

EXCEDENT EN FINES

Il correspond à la différence entre le pourcentage d'éléments de moins de 1 cm mesuré et celui calculé par la loi Log - normale ajustée sur les grains de plus de 1 cm de diamètre. Il semble que ce coefficient correspond aux matériaux transportés en suspension. Il s'exprime en pour-cent de la masse des matériaux. Il est décrit dans l'annexe II.

ELEMENTS DE REMPLISSAGE

Il s'agit de l'ensemble des structures morphologiques qui ne sont pas des éléments structurants.

Ils stockent les matériaux transportés dans des sites protégés de la vigueur de l'écoulement lorsque la concentration est élevée et - éventuellement - les restituent en cas de pénurie.

Les mouilles ou les dépôts latéraux en sont des exemples caractéristiques, mais d'autres zones, qui ne jouent pas un rôle dans la résistance du lit à l'érosion en font partie.

ELEMENTS STRUCTURANTS

Ce sont tous les éléments qui jouent un rôle prépondérant dans la résistance du lit à l'érosion. C'est par exemple le cas des seuils qui forment - jusqu'à une certaine limite - des "points durs" face à l'érosion.

Dans certains cas, il n'y a pas d'éléments structurants dans le lit. Il est alors très instable et sera modifié à la prochaine crue.

GRANULOMETRIE DE BASE

C'est la granulométrie du matériau utilisé sur modèle réduit pour le lit et - sur certaines modèles - pour l'injection de matériaux. Il s'agit d'un terme lié à des essais sur modèle réduit et non pas à des observations de terrain.

GRANULOMETRIE D'ENSEMBLE

C'est la granulométrie des matériaux en un point d'un lit de torrent. Elle comprend la surface mais aussi les couches plus profondes. Elle se distingue de la granulométrie de base[Ⓔ] du modèle réduit car elle ne concerne ni les apports amont, ni les matériaux évacués vers l'aval.

LAVE TORRENTIELLE

Par lave torrentielle on désigne un phénomène intermédiaire entre le charriage et le glissement de terrain. La difficulté de sa définition est renforcée par la variation des propriétés des laves torrentielles non seulement d'un torrent à l'autre mais aussi d'une lave à l'autre en fonction des matériaux qui lui sont fournis. Ainsi, plusieurs critères sont utilisés - suivant les auteurs - pour les définir.

Il semble que l'indépendance des laves entre elles et l'unicité de la vitesse de tous les éléments du mélange sont les plus caractéristiques. Cet aspect est abordé au paragraphe 2.2.1.

LAVAGE

C'est l'écoulement qui transforme le matériau du lit par érosion sélective. Il correspond à des conditions plus vigoureuses et une érosion plus intense (volume et taille des grains) que le lessivage[Ⓔ]. Il correspond au charriage ordinaire[Ⓔ].

LESSIVAGE

Il s'agit du transport solide marginal que l'on peut observer à la suite d'une crue. Les fluctuations turbulentes de l'écoulement parviennent à déloger les grains dissimulés derrière les blocs, entraînant une faible modification de la surface du lit.

LIT MAJEUR

C'est l'ensemble de la surface qui peut être soumise à un écoulement au cours d'une crue de forte ampleur. Souvent, c'est la largeur de la vallée qui en limite l'étendue.

Une autre définition considère l'ensemble des zones inondables. Sur modèle réduit, c'est l'ensemble de la zone couverte de matériaux mobilisables pour l'écoulement.

LIT MINEUR

Cette notion n'est valide qu'en dehors des périodes de divagations. C'est alors le - ou les - lits contenant le plus fort débit sans modification notable du lit (on retrouve ici la notion de débit dominant et de débit de plein bord). En période de crue, on parlera de "lit actif".

MARCHES D'ESCALIERS

Il s'agit d'une alternance de seuils^d et de mouilles^d, donnant l'aspect de marches d'escalier au profil en long de la surface de l'eau à l'étiage.

MODELE MONODIMENSIONNEL - MODELE BIDIMENSIONNEL

Il est possible, pour un modèle physique comme pour un modèle numérique de ne pas considérer le phénomène suivant les trois dimensions de l'espace mais de prendre en compte seulement un nombre réduit de dimensions. Ainsi, dans le cas d'un modèle fluvial, il est possible de considérer uniquement les variations longitudinales. On parle alors d'un modèle monodimensionnel.

Dans le cas des écoulements en torrent, il est très difficile de mesurer les variations des paramètres suivant l'axe vertical (en tout cas lorsque la profondeur de l'écoulement est de l'ordre du centimètre comme sur modèle réduit). Les variations suivant cette dimension sont négligées et que l'on considère uniquement les valeurs moyennes suivant une verticale. Il se présente généralement deux cas :

- l'écoulement est libre de divaguer. Dans ce cas, on parle de **modèle bidimensionnel** (dans le plan).
- Les divagations latérales ne sont pas possibles (on obtient généralement ce résultat par diminution de la largeur du modèle). On parle alors de **modèle monodimensionnel**.

MOUILLE

Il s'agit d'une zone de moindre pente, avec une hauteur d'eau supérieure à celle de l'ensemble du lit. Elle apparaît nettement à l'étiage où la pente de la ligne d'eau locale est très faible. Une mouille est généralement limitée par un seuil^d aval. Elle ne doit pas être confondue avec les zones à plus faible pente que l'on trouve dans les rivières torrentielles, ni les replats que forment les rivières en amont des sections de contrôle (confluence avec un torrent par exemple). Le paragraphe 2.7.8. reprend les définitions proposées par différents auteurs.

Lors d'une approche fine de ces structures morphologiques, il est cependant nécessaire de distinguer deux zones distinctes :

- La structure de la mouille, plus profonde et plus grossière, a été formée en même temps que les seuils. Ordinairement, elle n'apparaît pas et n'a aucun contact avec l'écoulement.
- La couche superficielle de la mouille qui correspond aux respirations du lit, et qui échange des matériaux avec l'écoulement. C'est elle qui est ordinairement visible et qui est considérée au cours de ce travail (sauf mention contraire).

PAVAGE

Le pavage désigne les caractéristiques particulières de la couche supérieure du lit. L'exposition permanente de celle-ci à l'écoulement la rend plus résistante à l'érosion. Elle se distingue donc par une granulométrie et une imbrication des éléments particulières. Il est cependant difficile de donner une définition plus précise et le

pavage est généralement perçu comme l'explication de l'écart entre formules et mesures de terrain.

Le terme de pavage regroupant une multitude de phénomènes distincts, certains auteurs (voir chapitre 2) ont proposé différents termes correspondant chacun à des réalités distinctes : pavage, carapace, armurage, dallage, etc...).

Cependant, chacun adopte une définition personnelle et souvent incompatible avec celles fournies par les autres auteurs. Pour éviter toute ambiguïté, le terme de pavage sera le seul employé dans ce document.

Les différents types de pavage ainsi que les mécanismes de formation sont détaillés au paragraphe 2.7.9.

PAVAGE MOBILE

Il s'agit d'un tri granulométrique vertical en équilibre dynamique avec le transport solide. Le lit fin est recouvert d'éléments grossiers en mouvement le protégeant de l'érosion.

PLATE-FORME TORRENTIELLE

Suite à un accord entre le CEMAGREF, SOGREAH, les services RTM et le Laboratoire d'Hydraulique de France, une plate-forme torrentielle a été construite à Grenoble. Cet outil, unique en France, doit permettre de réaliser des études industrielles dans des conditions plus rationnelles mais aussi d'effectuer des travaux de recherche.

Il s'agit d'une plate forme en acier de 15 m de longueur et de 5 m de largeur, soutenue par une charpente métallique. Sa pente (jusqu'à 20 %) peut être modifiée grâce à un système de levage. Les essais réalisés pour le dimensionnement de la plage de dépôt du *S^t Vincent* (chapitre 6) ont été les premiers réalisés sur cet outil.

D'autre part, un canal, de dimension plus réduite (0.6 m × 10 m), plus particulièrement destiné aux travaux de recherche, partage les systèmes d'alimentation de la plate-forme. C'est lui qui a permis la première partie des essais (chapitre 4 & 5).

RAPIDE

On retient ici la définition rencontrée usuellement dans la littérature anglo-saxonne (*Riffles*) en particulier chez WHITTAKER (1987).

Le terme de rapide correspond à un rapprochement de seuils^d qui entraîne une augmentation locale de la pente. Cette notion doit être complétée par l'idée qu'il s'agit d'une structure **intrinsèquement** créée par l'écoulement.

Une telle structure n'a donc aucun rapport avec les rapides engendrés par l'apport de matériaux par un éboulement ou un torrent.

RESPIRATION

Ce terme décrit l'alternance rapide de dépôts et de reprises. Il y a donc, durant les crues, une très nette évolution du niveau du lit et une variation importante du volume des dépôts.

STRUCTURE MORPHOLOGIQUE

Le terme de **structure** morphologique est lié au comportement hydraulique local : c'est par exemple le cas d'un seuil ou d'un dépôt latéral. Il s'agit des éléments de base constituant le lit.

SEUIL

Il s'agit d'une structure morphologique^{ed} qui regroupe des éléments grossiers et correspond à une augmentation de la pente. La définition la plus adaptée aux torrents semble être la suivante :

"alignement" transversal de blocs ralentissant l'écoulement et formant une rupture de la ligne d'énergie.

Cette structure ne doit pas être confondue avec les rapides^{ed} (qui correspondent à une concentration de seuils) ou avec les seuils que l'on trouve au point d'inflexion dans les rivières à faible pente.

ZONE MORPHOLOGIQUE

On appelle **zone** morphologique une surface qui, à l'échelle du bassin versant, joue un rôle homogène (par exemple une zone de dépôt en amont d'un seuil rocheux ou une zone d'érosion au bas d'un glissement de terrain). Il s'agit donc d'un élément beaucoup plus étendue que la **structure** morphologique^{ed}.

SIGNIFICATION DES SYMBOLES

On trouvera dans cette table les principaux symboles utilisés, leur dimension, leur signification et, dans certains cas, une formule les reliant à d'autres paramètres:

I) Lettres Romaines:

a_i		fréquence de la classe i dans la couche active	
A	m ²	aire de la section mouillée de l'écoulement	
B	m	Largueur du canal	
C		concentration en matériau	$C = \frac{Q_s}{Q}$
d	m	diamètre des grains (correspondant à la plus petite maille de tamis à travers laquelle passe le grain)	
d_i	m	diamètre des grains pour lequel i % du mélange (en poids) est constitué de grains plus petits	
d_m	m	diamètre moyen des grains (nb effectif de l'échantillon)	$d_m = \frac{1}{nb} \sum_{j=1}^{nb} d_j$
E	m	épaisseur de la couche active	
E*		épaisseur adimensionnelle de la couche active	$E_* = \frac{E}{d_{90}}$
f		facteur de friction	$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{\sqrt{gRI}}$
f_i		fréquence de la classe i (diamètre d _i)	
Fr		nombre de Froude	$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$
g	m.s ⁻²	accélération gravitationnelle	
h	m	hauteur d'eau	
h_m	m	hauteur du mélange eau + sédiments	
H		Charge de l'écoulement	
I		pente du lit	$I = \text{tg}(\alpha)$
K_s	m ^{1/3/s}	Coefficient de STRICKLER	
k_s	m	hauteur de rugosité de peau du lit	
L	m	Largueur du lit sur modèle	
n		indice de porosité du matériau	

M	kg	masse de matériaux	
m_i		indice de mobilité de la classe i	$m_i = \frac{t_i}{a_i}$
p	m	périmètre mouillé	
Q	m ³ /s	débit liquide total	
q	m ² /s	débit liquide unitaire	$q=Q/B$
q_c	m ² /s	débit liquide unitaire critique de début de mouvement	
Q_s	m ³ /s	débit solide total	
q_s	m ² /s	débit solide unitaire	$q_s=Q_s/B$
q_{s*}		débit solide adimensionnel	$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)gd^3}}$
R		Coefficient de détermination des relations statistiques	
R	m	Rayon hydraulique	$R=A/p$
ℜ		Nombre de Reynolds	$\mathcal{R} = \frac{\rho U h}{\mu}$
ℜ_e		Nombre de Reynolds du grain	$\mathcal{R}_e = \frac{\rho U d}{\mu}$
s		densité relative des matériaux	$s = \frac{\rho_s}{\rho}$
S	m ²	surface du bassin versant	
t_i		fraction de la classe i dans le matériau transporté	
U	m/s	vitesse moyenne de l'écoulement	
U_s	m/s	vitesse moyenne des sédiments transportés	
U*	m/s	vitesse de friction	$U_* = \sqrt{\tau/\rho} = \sqrt{gh\bar{I}}$
y	m	ordonnée	
Y	J	énergie potentielle	
V_s	m ³	volume solide de matériaux	
w	m/s	vitesse de chute des matériaux en eau calme	

II) Lettres Grecques:

α	$^{\circ}$	angle entre le lit et l'horizontale	
δ	m	épaisseur de la couche limite	
ϕ	$^{\circ}$	angle au repos des matériaux	
ϕ'	$^{\circ}$	angle de friction des matériaux	
κ		Constant de Karman ($\kappa=0.4$)	
μ	Ns/m ²	viscosité dynamique	
ν	m ² /s	viscosité cinématique	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$
ρ	t/m ³	masse volumique du fluide	
ρ_s	t/m ³	masse volumique du sédiment	
σ	N/m ²	contrainte normale	
τ	N/m ²	contrainte de cisaillement au niveau du fond	$\tau = \rho g R I$
τ_c	N/m ²	contrainte critique de cisaillement (début de transport)	
τ_*		contrainte dimensionnelle de cisaillement	$\tau_* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)d} = \frac{\rho R i}{(\rho_s - \rho)d}$
τ_{*c}		contrainte critique dimensionnelle de cisaillement	$\tau_{*c} = \frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho)d}$
τ_{*sc}		contrainte critique dimensionnelle de cisaillement avec correction de l'effet de la pente	

"Chaque année, les eaux arrachent quelques lambeaux de champs à de malheureux paysans, qui voient engloutir leur dernier pain, sans qu'ils puissent le sauver par un léger sacrifice. C'est que ce sacrifice, si mince qu'il paraisse aux opulents de nos villes, est pour eux une excessive dépense, qu'ils ne peuvent pas faire parce qu'ils n'ont rien, littéralement rien(...).

*Tout se passe donc ici dans l'ombre, et comme en famille. Les rares plaintes qu'on y entend ne vont jamais plus loin que les cols qui le séparent du reste de la France. Et si l'on demande comment une population qui voit chaque jour son territoire tomber en lambeaux, peut se résigner de la sorte sans jeter de hauts cris, je répondrai par un seul mot : **l'habitude**. Le montagnard s'est accoutumé aux torrents, comme aux avalanches, aux tourmentes, aux précipices, et aux autres accidents attachés au sol de son pays. Il se débat contre le fléau du mieux qu'il peut, le tenant pour une loi fatale dont il n'a pas l'espoir de s'affranchir."*

ALEXANDRE SURELL (1870)

*Etude sur les torrents des
Hautes -Alpes
Paris - Dunod éditeur*



1 - Introduction - Généralités

Sommaire

1.1. Objectifs.....	31
1.2. Particularités des torrents.....	31
1.2.1. Définition d'un torrent.....	31
1.2.2. Nature de l'écoulement.....	32
1.2.3. Transport solide.....	32
1.2.4. Contraste morphologique - difficulté des mesures.....	33
1.3. Lacunes des méthodes classiques d'approche d'un torrent.....	34
1.3.1. Objectifs des études d'ingénierie dans le domaine des risques torrentiels.....	34
1.3.2. Morphologie du lit.....	34
1.3.3. Outils disponibles.....	35
1.3.4. Importance du pavage.....	35
1.3.5. Conclusion.....	36
1.4. Définition du champ de cette étude.....	36
1.4.1. Hiérarchisation des phénomènes mis en jeu.....	36
1.4.2. Caractère prépondérant du tri granulométrique à proximité du seuil de début de mouvement.....	37
1.4.3. Rôle de la morphologie.....	37
1.4.4. Définition d'une lecture morphologique d'un lit torrentiel.....	38
1.5. Outils disponibles.....	39
1.5.1. Mesures de terrain.....	39
1.5.1.1. La morphologie torrentielle.....	40
1.5.1.2. La granulométrie.....	40
1.5.2. Modèle réduit.....	40
1.5.3. Conclusion.....	41
1.6. Méthodologie de l'étude.....	41
1.6.1. Champs d'étude de complexité croissante.....	41
1.6.2. Effet local d'un écoulement d'eau claire sur une granulométrie étendue.....	42
1.6.3. Passage d'une modélisation monodimensionnelle à une approche bidimensionnelle.....	42
1.6.4. Effets des variations temporelles et de l'apport amont de matériaux sur une zone de dépôt.....	43
1.6.5. Analyse de la complexité des lits naturels.....	43
1.7. Conclusion.....	43

1.1. Objectifs

Lors des études concernant les torrents de montagne, l'interprétation des caractéristiques morphologiques du lit est généralement essentielle et conditionne la pertinence des travaux effectués. Elle est cependant très difficile tant les connaissances actuelles de ces phénomènes sont sommaires.

D'autre part, la mesure de la granulométrie des matériaux est indispensable à une quantification des phénomènes, mais elle est problématique à cause de la très forte variabilité et de l'aspect souvent chaotique des lits.

Ces deux aspects, essentiels pour une approche de la dynamique torrentielle, constituent l'objet de ce travail. Ce chapitre introductif est destiné à délimiter les différents phénomènes intervenant et à établir la démarche suivie pour leur étude.

1.2. Particularités des torrents

1.2.1. Définition d'un torrent

Il s'agit seulement ici de cerner le domaine d'étude et non de définir une typologie des cours d'eau. La caractéristique principale d'un écoulement est généralement la pente. Ainsi, BERNARD (1925) propose une classification basée sur ce paramètre :

- pente inférieure à 1.5 % : rivière
- pente entre 1.5 et 6% : rivière torrentielle
- pente supérieure à 6% : torrent

Evidemment, la réduction de la description d'un cours d'eau à un seul paramètre n'est acceptable que pour une approche extrêmement sommaire. Ainsi, malgré des rapides à 3% de pente, personne ne considère le fleuve *Zaire* comme une rivière torrentielle!

Le torrent présente d'autres particularités par rapport à la rivière :

- un bassin versant de taille plus réduite,
- un écoulement "ordinaire" plus faible ou même absent,
- un lit beaucoup plus irrégulier,
- une hydrologie plus tranchée avec des crues importantes et brusques,
- des écoulements plus rapides et plus turbulents.

Mais, le transport solide constitue la principale spécificité du torrent : par rapport au débinaire ruisseau, le torrent transporte des quantités importantes de matériaux, change de lit, érode ses berges ou engrave les terrains alentour. Cette caractéristique est d'autant plus importante que la forte pente permet un transport solide considérable, brutal et prenant de multiples formes.

C'est ce fort transport solide qui constitue l'objet central de cette étude.

1.2.2. Nature de l'écoulement

En rivière, l'écoulement présente des caractéristiques bien connues (distribution des vitesses, turbulence développée...), et les paramètres pertinents (section mouillée, pente, profondeur d'eau, rugosité) ont une signification physique non ambiguë.

Au contraire, la spécificité de l'écoulement torrentiel se manifeste déjà en basses eaux : le lit apparaît comme une succession de discontinuités, la pente locale est très variable, la hauteur d'eau est difficilement mesurable, les ressauts hydrauliques brisent l'écoulement.

D'autre part, les éléments du lit ont un diamètre de l'ordre de la profondeur de l'écoulement et les filets liquides doivent se faufiler entre les blocs. On est loin alors de la distribution logarithmique des vitesses observée en rivière.

Mais c'est durant les crues que les particularités des écoulements torrentiels apparaissent le plus nettement. Le transport solide devient alors tellement important qu'il ne peut plus être négligé dans l'approche des caractéristiques de l'écoulement. Il est alors courant que la variation du fond soit très supérieure à la hauteur maximum de l'eau.

1.2.3. Transport solide

La capacité de transport lors des crues est telle que des phénomènes particuliers peuvent apparaître dans certains cas :

- Des forces nouvelles se manifestent comme les collisions entre les grains transportés lorsqu'ils sont nombreux ou comme les forces électrochimiques dans le cas d'une forte concentration en argile.
- L'écoulement semble monophasique tant les matériaux et l'eau sont intimement liés.
- Les interactions entre lit et transport solide sont telles que l'écoulement change de caractéristiques extrêmement rapidement.

Cependant, la principale difficulté provient des multiples formes du transport solide. En effet, la forte pente, en mettant en jeu des forces considérables, permet une multitude de phénomènes de transport. Or, il ne semble pas possible à l'heure actuelle d'étudier cet ensemble de phénomènes à partir des mêmes outils qu'en hydraulique fluviale. Il est donc nécessaire de définir chacun des processus de transport qui se produisent en torrent. On distingue essentiellement trois phénomènes :

- **La suspension** correspond au maintien des matériaux dans l'écoulement par la turbulence. Il ne peut s'agir que de fines particules car, même dans un écoulement extrêmement turbulent, le diamètre du grain ne peut excéder 1 à 2 cm.
- **Le charriage**[♠] déplace les grains en les roulant ou en les glissant sur le fond. Transport classique en rivière, il présente des caractéristiques étonnantes dans le

[♠] Ce signe signale les termes définis dans le glossaire.

cas des torrents où l'on parle quelquefois de charriage hyperconcentré⁴³. Dans ce cas, les caractéristiques de l'écoulement sont dominées par le transport solide. De plus, les interactions avec le lit ont un rôle prépondérant. Ce processus fait donc l'objet d'une double interaction : vis à vis de l'écoulement mais aussi du lit. L'importance relative de chacune de ces interactions varie largement et dépend essentiellement du débit solide. Il est donc probable qu'il faille considérer deux phénomènes distincts suivant la prépondérance du lit ou de l'écoulement.

Les laves torrentielles⁴⁴ constituent le phénomène le plus spécifique des torrents. Il s'agit d'un phénomène intermédiaire entre le charriage et le glissement de terrain. Bien qu'il soit difficile d'en donner une définition rigoureuse, elles présentent les caractéristiques suivantes :

- ◆ fonctionnement par bouffées indépendantes,
- ◆ forte viscosité,
- ◆ concentration en matériaux très élevée,
- ◆ arrêt en masse de la coulée.

En fait, bien qu'il s'agisse de phénomènes de toute autre nature que ceux qui se produisent en rivière, l'absence de frontière nette avec le charriage hyperconcentré montre à quel point les fortes pentes parviennent à dénaturer le charriage.

Une approche de l'ensemble des transports solides en torrent est détaillée au paragraphe 2.2.

1.2.4. Contraste morphologique - difficulté des mesures

Le torrent apparaît comme un lieu où les processus physiques sont extrêmes, les phénomènes de tri et de régulation présents en rivière étant gommés par la brutalité du comportement torrentiel. Il n'est pas surprenant que cette démesure soit traduite par la morphologie du lit.

L'aspect chaotique des lits torrentiels est tel qu'il semble *a priori* difficile d'en tirer des renseignements utiles. La morphologie est extrêmement tranchée, constituée de détails de taille très variable et apparemment indépendants. Une des principales difficultés est de définir la dimension des structures à prendre en compte.

D'autre part, à l'influence du torrent s'ajoutent souvent celles d'éléments morphologiques liés directement à la structure ou à la dynamique du versant (seuil rocheux, éboulement, etc...). De plus, les processus se combinent et interagissent aboutissant généralement à une morphologie inextricable.

Dans un tel contexte, la mesure devient extrêmement complexe car il ne s'agit plus de mesurer une granulométrie ou une section mouillée mais de savoir où le faire, la variabilité des paramètres enlevant toute signification à une mesure non maîtrisée.

Notre étude comprendra donc une grande partie de recherche méthodologique consacrée à ce sujet.

1.3. Lacunes des méthodes classiques d'approche d'un torrent

Dans cette étude, nous considérons uniquement le cas des torrents pour lesquels le mode de transport prépondérant est le charriage. Le manque d'outil performant et la difficulté d'interprétation des caractéristiques du terrain expliquent que ce soit dans ce cas que les lacunes sont actuellement les plus nettes.

En effet, dans le cas des torrents à laves, la démarche serait la même mais les moyens d'investigations sont différents et une approche plus fine est possible, en particulier à cause de l'interaction réduite entre le lit et l'écoulement.

1.3.1. Objectifs des études d'ingénierie dans le domaine des risques torrentiels.

Les études de torrent visent généralement le dimensionnement d'ouvrages de protection ou la délimitation de zones exposées. Il s'agit donc de déterminer les sections mouillées lors de crues, les volumes de matériaux transportés et les zones de dépôt ou d'érosion.

Outre l'étude hydrologique, il est nécessaire de définir le type de transport solide se produisant dans le torrent pour approcher les paramètres de l'écoulement à partir de formules adaptées. La plupart d'entre elles font alors intervenir les caractéristiques du matériau, en particulier par le biais de la granulométrie.

Il apparaît alors deux difficultés :

1. la détermination de ces paramètres,
2. l'application de formules établies généralement à partir d'essais en canal, aux particularités du torrent étudié.

1.3.2. Morphologie du lit

Les informations disponibles pour les études d'ingénierie sont généralement extrêmement réduites, chacun des milliers de torrents que comptent les Alpes n'étant pas aussi bien surveillé et connu que les quelques rivières qui parcourent le massif. Ainsi, outre quelques témoignages trop souvent fragmentaires, le seul moyen d'approche est d'étudier la morphologie du lit torrentiel malgré la difficulté liée à cette démarche.

Cette étape est usuellement limitée à une étude sommaire des formes d'érosion dans le bassin versant, un relevé du profil en long et des ouvrages d'art. Elle permet généralement de déterminer le processus de transport solide (lave ou charriage) et comprend quelquefois des relevés de granulométrie.

Cependant, il apparaît toujours une difficulté à exploiter toutes les informations fournies par la lecture du lit à cause du manque de repères et de références dans ce domaine.

1.3.3. Outils disponibles

Lors d'une étude d'ingénierie, une fois déterminé le type de transport solide, il est possible de quantifier le transport solide en utilisant des formules liant conditions hydrauliques et débit solide calées sur des essais de laboratoire. Se pose alors un double problème : la détermination des conditions hydrauliques et l'utilisation de formules de transport solide. Cependant, il semble qu'il est possible de regrouper les deux approches en considérant que les caractéristiques de la section mouillée sont un résultat du transport solide (LEFORT 1991).

Pour le transport solide, des formulations spécifiques aux fortes pentes existent depuis peu de temps (SMART & JAEGGI 1983). Cependant, elles correspondent à des conditions hydrauliques extrêmement vigoureuses et leur application est difficile car elles conduisent à une surestimation du débit solide. Ainsi, MEUNIER (1990) considère qu'il faut diviser les valeurs obtenues dans un rapport de 5 à 10 dans le cas d'une crue réelle de taille moyenne ou médiocre.

RICKENMANN (1990), en appliquant des formules de laboratoires à des crues réelles, observe que le volume calculé est nettement supérieur à l'estimation du volume observé. Il est alors nécessaire de considérer le d_{90} au lieu du d_m pour le calcul du seuil de début de mouvement (il se pose en plus le problème du choix de la granulométrie "représentative", l'écart n'étant absolument pas négligeable - par exemple - entre la granulométrie du lit et celle des matériaux transportés).

On trouvera la liste des symboles utilisés, leur dimension et leur signification dans les premières pages de ce travail.

Il attribue cette différence à l'effet du pavage dans le cas d'une granulométrie étendue. En effet, dans les essais conduisant à ce type de formulation, le charriage n'est commandé que par les conditions hydrauliques. Or, dans les cas naturels, la structuration du lit limite la fourniture de matériaux et le débit solide sauf cas très exceptionnel.

1.3.4. Importance du pavage

Ce phénomène de contrôle du transport solide par la surface du lit est généralement appelé pavage[¶]. Cependant, les terminologies et les définitions sont multiples.

La question est pourtant d'importance car il s'agit du point d'achoppement de toutes les études : il n'y a pas d'outil permettant de quantifier la résistance du lit à une crue lorsqu'il est pavé.

Pourtant, dans certains cas, la rupture du pavage bouleverse totalement le fonctionnement du torrent et génère des phénomènes de grande ampleur. L'exemple du torrent de la *Ravoire* (Savoie) est particulièrement marquant : le dépavage d'un lit stable depuis très longtemps a conduit à la formation de laves torrentielles et à l'encaissement du lit d'une quinzaine de mètres en quelques jours.

Indépendamment de ce cas extrême, dont le développement ressort des laves torrentielles, l'ignorance de ce type de phénomène est surtout limitante pour les études de crues ordinaires, du volume annuel transporté et du fonctionnement des plages de dépôt. Ce type de protection étant l'un des plus répandus, les progrès à attendre d'une meilleure connaissance de l'effet du lit sur le transport solide sont très importants.

1.3.5. Conclusion

Comme on vient de le voir, les lacunes méthodologiques en ce qui concerne les torrents et leurs écoulements concernent les manifestations du transport solide et leurs liaisons avec la morphologie torrentielle - notamment le pavage. Le but de cette étude est de préciser ces relations.

1.4. Définition du champ de cette étude

1.4.1. Hiérarchisation des phénomènes mis en jeu

L'effet du lit sur le transport solide paraît être un phénomène important, mais il est très mal connu. Dans les approches classiques, la nature du lit intervient de deux façons : par les conditions hydrauliques¹ et par la granulométrie.

Les conditions hydrauliques comme le débit solide dépendent :

- **du débit liquide.**
- **de la pente.** On considère généralement la pente moyenne du cours d'eau. Cependant, dans le cadre d'un torrent, celle-ci perd de sa signification, en particulier à cause des alternances de seuils^{ph} et de mouilles^{ph}. Il semble donc nécessaire de connaître la morphologie avant de pouvoir approcher les conditions d'écoulement.
- **des caractéristiques géométriques de la section mouillée.** Comme précédemment, les paramètres globaux ont peu de signification, les variations longitudinales de la morphologie ayant un rôle prépondérant sur l'écoulement.
- **de la granulométrie des matériaux.** C'est là un élément extrêmement important, étant donnée l'étendue granulométrique des lits torrentiels. En effet, la démesure des phénomènes liés au transport solide permet le transport de blocs de plusieurs tonnes, sans que l'usure ou le tri uniformisent assez rapidement la taille des grains comme cela se produit dans le cas des rivières.
Ainsi, les éléments fins voisinent les blocs d'un mètre de diamètre, chacun jouant un rôle particulier dans la dynamique du lit. Or, les essais sur modèle ont montré que la taille du grain, mais aussi l'étendue granulométrique jouent un rôle important dans le charriage torrentiel. De plus, granulométrie et morphologie sont directement liées.

Les caractéristiques morphologiques et granulométriques du lit sont donc au cœur de son influence sur le transport solide. Cependant, l'importance de chaque paramètre n'est pas plus connue que les phénomènes conduisant à un lit pavé.

¹ Par conditions hydrauliques, on désigne l'ensemble des caractéristiques de l'écoulement, c'est à dire sa vitesse, sa hauteur, sa largeur, la contrainte de cisaillement correspondante, etc... Ces caractéristiques sont dépendantes du débit liquide total, du débit solide mais aussi du lit (pente, rugosité, structuration).

Ainsi, avant toute quantification, il est nécessaire de savoir quels sont les mécanismes mis en jeu. Ce travail vise donc une compréhension et une hiérarchisation des phénomènes physiques et des liens entre morphologie et dynamique torrentielle.

1.4.2. Caractère prépondérant du tri granulométrique à proximité du seuil de début de mouvement

Le charriage torrentiel semble regrouper deux phénomènes distincts :

1. Pour des conditions hydrauliques nettement plus vigoureuses que les conditions de début de mouvement des grains, il y a peu de tri granulométrique et l'on se trouve alors dans les conditions du charriage hyperconcentré.
2. Au contraire, lorsque l'on se rapproche des conditions de début de transport, les éléments fins sont plus facilement déplacés. Cette sélection des grains transportés - et par contre coup celle de ceux qui restent dans le lit - est à l'origine de la formation d'un lit pavé : ainsi, la structuration du lit se produit lorsque le débit solide diminue. Il y a alors une grande variabilité du transport solide et les phénomènes sont particulièrement mal connus.

Nous allons donc nous attacher à l'étude des phénomènes torrentiels lorsque les écoulements sont relativement réduits, afin d'en dégager la spécificité par rapport aux périodes de très fort transport solide qui sont relativement bien connues.

1.4.3. Rôle de la morphologie

La morphologie est importante dans une étude de cas car elle est un bon indicateur des phénomènes qui se sont déjà déroulés. De plus, elle a un rôle considérable dans la stabilité du lit.

Par exemple, une structure composée d'alternances de seuils et de mouilles, indépendamment de l'imbrication des grains, sera plus résistante à l'écoulement car celui-ci sera brisé par un ressaut hydraulique à chaque seuil. Ainsi, morphologie et granulométrie sont indissociables car les éléments des seuils sont nettement plus grossiers que ceux des mouilles.

D'autres phénomènes, comme les dépôts temporaires qui permettent la régulation du transport solide, sont aussi très importants car ils peuvent permettre le passage d'eau chargée dans un ouvrage, alors que leur suppression (par exemple par un resserrement du lit) pourrait entraîner des dépôts donc des débordements dans ces mêmes ouvrages.

Il est donc important de savoir différencier les différentes formations morphologiques et de les caractériser. C'est un des buts de notre travail.

1.4.4. Définition d'une lecture morphologique d'un lit torrentiel

Cependant, la morphologie pose actuellement un double problème :

- elle n'est pas quantifiable mais est plutôt traduite par un faisceau d'impressions. Il est difficile dans un tel cadre de l'utiliser de façon objective malgré la richesse des informations qu'elle fournit.
- Il n'y a pas de terminologie établie des éléments morphologiques. Ainsi, un vocable identique cache bien souvent des réalités différentes et les confrontations entre spécialistes débutent généralement par une définition de chaque structure morphologique... ou par une succession de malentendus.

Il est donc nécessaire d'unifier les terminologies mais aussi de donner une définition objective de chaque élément morphologique en fonction de sa situation dans le lit, sa granulométrie mais aussi des phénomènes qui l'ont engendrée, de son rôle dans la structuration du lit et de son évolution.

Un des buts de notre étude est donc une rationalisation de la lecture morphologique d'un lit torrentiel. Mais elle n'est possible que si les différents phénomènes se produisant dans un torrent sont identifiés.

Comme on le voit, notre étude devra nécessairement analyser en **même temps** la morphologie torrentielle et les phénomènes qu'elle influence et qui la structurent. Nous serons donc conduits à des aller-retours entre ces deux volets de la dynamique torrentielle. Cette nécessité de prendre en compte des interactions, qui interdit un raisonnement linéaire, complique grandement l'interprétation de la lecture morphologique d'un lit torrentiel.

1.5. Outils disponibles

Il n'existe pas, à ce jour, de théorie satisfaisante pour étudier rationnellement le charriage torrentiel^{ed}. Cette lacune s'explique en partie par le manque de mesures dans ce domaine mais surtout par la complexité des phénomènes. On dispose cependant de formules basées sur des essais en modèle réduit (comme celles de SMART & JAEGGI ou de LEFORT exposées au paragraphe 2.5) et établies à partir de méthodes statistiques. Elles ont un intérêt évident pour les études d'ingénierie, mais sont de peu d'utilité pour mieux comprendre les phénomènes torrentiels. C'est pourquoi les différents moyens d'étude actuellement disponibles vont être décrits en faisant porter l'attention sur leurs lacunes respectives.

Trois outils sont utilisables pour approcher ce type de phénomène.

1. le plus ancien consiste à observer les **torrents réels** et à y faire des mesures. Cependant, la complexité des phénomènes et leur caractère intermittent sont un frein puissant à ce type d'approche.
2. une méthode beaucoup plus répandue consiste à réaliser des expériences sur **modèle physique réduit**, en définissant des rapports de similitude entre modèle et nature.
3. Enfin, le **modèle mathématique** est beaucoup plus récent. Cependant, la connaissance du charriage torrentiel est encore si sommaire que ce type d'approche ne peut être utilisé seul, par manque d'équations pertinentes.

Ce travail est axé sur la confrontation entre modèle physique et observations de terrain, les deux approches étant complémentaires.

1.5.1. Mesures de terrain

Les mesures de terrain sont de deux ordres :

- **Les relevés pendant les crues** donnent des informations d'une très grande richesse, car ils reflètent l'intégralité des processus. Les résultats obtenus en hydrologie montrent les apports de telles observations. Cependant, les mesures liées au transport solide sont considérablement plus difficiles. Si de tels relevés se révèlent indispensables à long terme, ils sont très difficiles à mettre en oeuvre comme en témoignent les diverses tentatives réalisées récemment en Europe, aux Etats Unis et au Japon.
- **Les mesures morphologiques réalisées après la crue.** Dans ce cas, seul le résultat ultime d'un enchaînement de phénomènes complexes est observable, sans que l'on puisse en connaître les étapes. Il est ainsi extrêmement difficile de déterminer le phénomène se rattachant à la grandeur mesurée. Cependant, ce handicap est compensé par la possibilité d'observations extrêmement fines. Cette méthode, si elle bénéficie d'avantages pratiques évidents, reste malgré tout limitée tant que le lien entre morphologie et écoulement n'a pu être rigoureusement établi.

1.5.1.1. La morphologie torrentielle

Il s'agit de l'ensemble des observations que l'on peut faire sur un torrent "au repos". Comme on l'a vu au paragraphe 1-2, cette approche est primordiale dans toutes les études de torrent.

C'est SURREL (1870), en France, qui le premier a montré tout l'intérêt de l'étude du profil en long d'un torrent.

Les autres caractéristiques du lit, profil en travers, sinuosité, ou les alternances de seuils et de mouilles ont été considérées - entre autres - par RAMETTE (1981) qui a montré, par des considérations énergétiques, qu'un écoulement recherche une section d'écoulement de proportions adaptées au transport solide. On ne peut donc étudier celui-ci sans rendre à l'écoulement sa liberté de divagation. Les travaux de LEFORT (1991) ont d'ailleurs mis en évidence le peu de signification du débit unitaire (débit total divisé par la largeur de l'écoulement).

De même, les études de YANG (1989) montrent que la théorie de moindre dissipation énergétique, en accord avec les lois physiques fondamentales, permet de prévoir les évolutions dans les rivières. Il apparaît en particulier que les relations entre morphologie et transport solide sont beaucoup plus fortes que les théories classiques le laissent penser.

Avec une approche beaucoup plus expérimentale, WHITTAKER & JAEGGI (1982) ont montré la liaison directe entre le débit solide et les alternances de seuils et de mouilles dans le cas des torrents.

Il est donc clair que l'étude de la morphologie est un moyen d'approche puissant des phénomènes torrentiels.

1.5.1.2. La granulométrie

Elle désigne la répartition de taille des éléments d'un échantillon. Dès les origines de l'étude du transport des granulats par un courant, le diamètre des matériaux déplacés a été un paramètre de premier ordre.

L'étude granulométrique permet de distinguer les différents éléments participant au fonctionnement du torrent. Une mesure par zone doit donc aboutir à une définition rationnelle des différents secteurs morphologiques. De telles mesures sont probablement beaucoup plus objectives dans leurs relations avec l'écoulement qu'une description morphologique globale.

1.5.2. Modèle réduit

Le modèle réduit est un outil utilisé depuis longtemps pour les études hydrauliques. Cependant, même dans le cas d'écoulements d'eau claire, la similitude n'est jamais parfaite. Malgré cela, les résultats obtenus, notamment dans le cas d'écoulements à surface libre, sont généralement excellents.

La similitude entre les modèles réduits et le terrain est abordée au paragraphe 3.3.1.

Si la similitude des écoulements liquides est relativement bien respectée, les connaissances sont nettement plus sommaires dans le cas du transport solide, et la

similitude ne peut alors être établie sur des bases théoriques puisqu'aucune théorie complète n'existe. On considère généralement que le respect des conditions de similitude des phénomènes hydrauliques est suffisant.

Cependant, le modèle réduit est un outil de tout premier ordre, non seulement dans le cadre du dimensionnement d'ouvrages, mais aussi pour la recherche. C'est lui en effet qui permet de suivre l'évolution des processus au cours d'une crue.

De plus, sa souplesse permet de faire des études de sensibilité en modifiant les paramètres. D'autre part, les mesures en laboratoire sont beaucoup plus faciles que sur le terrain et permettent un suivi extrêmement fin des phénomènes. C'est donc le principal outil de recherche en hydraulique torrentielle.

1.5.3. Conclusion

On va voir en effet au paragraphe suivant que l'utilisation successive des deux outils, permet une étude de la dynamique torrentielle en partant du simple (phénomènes "ponctuels" sur petit canal), pour expliquer le complexe (écoulement divaguant sur une vaste surface et reproduisant les hydrogrammes solide et liquide d'une crue). Une fois cette progression accomplie, nous franchirons un pas supplémentaire dans la complexité en abordant le cas des torrents réels.

Le modèle apparaît donc comme un outil complémentaire des mesures de terrain, et la confrontation des deux méthodes d'approche semble particulièrement prometteuse.

1.6. Méthodologie de l'étude

1.6.1. Champs d'étude de complexité croissante

La connaissance du pavage est actuellement si sommaire qu'il est nécessaire de clarifier le rôle de chaque phénomène dans la création d'un lit pavé. Or le domaine concerné est extrêmement vaste et aucun champ d'étude n'est actuellement cerné de façon satisfaisante : on ne connaît pas plus les mécanismes concernant le masquage des petites particules par de plus grosses que le tri de matériaux de granulométrie étendue le long d'un cône de dépôt torrentiel.

Ainsi, il est nécessaire d'approcher le processus dans toute sa complexité tout en prêtant une attention particulière au phénomène élémentaire : le tri granulométrique local. En effet, différentes échelles étant imbriquées, il faut d'abord connaître les processus intervenant localement puis introduire d'autres phénomènes par augmentation progressive de la complexité du champ d'étude.

Deux moyens d'investigations seront utilisés : le modèle réduit et les mesures de terrain. Le premier va permettre d'étudier l'intimité du phénomène, d'en suivre l'évolution en "épurant" les conditions expérimentales de façon à réaliser un suivi aussi fin que possible. Ensuite, l'analyse du rôle de chaque phénomène sur la formation du lit sera conduite en changeant les conditions expérimentales. En augmentant progressivement la complexité du champ d'étude, il va être possible de reproduire,

aussi finement que les modèles réduits actuels le permettent, les mécanismes se déroulant dans un lit torrentiel et en particulier sur le cône de dépôt du torrent.

1.6.2. Effet local d'un écoulement d'eau claire sur une granulométrie étendue

Les modèles de transport solide par charriage d'une granulométrie étendue butent tous sur le même problème : comment se produit le tri granulométrique. Le paragraphe 2.6 montre que les formulations se sont multipliées mais qu'aucune approche n'est encore définitive.

Cette absence de résultat satisfaisant s'explique par la complexité du phénomène. Il est en effet admis que ce tri granulométrique existe à différentes échelles et qu'il évolue dans des proportions considérables en fonction des conditions hydrauliques. Face à une telle complexité, il est indispensable de délimiter clairement les objectifs et les conditions de l'étude.

Il apparaît que le pavage d'un lit est formé après une crue par un écoulement peu chargé en matériaux.

Dans une première étape, on va isoler autant que possible le phénomène de tri granulométrique correspondant au pavage. L'objectif est de suivre l'évolution de la mobilité de chaque classe granulométrique au moment où le pavage se forme afin de comprendre sa genèse. Des expérimentations vont donc être conduites avec un modèle de dimensions aussi réduites que possible (écoulement monodimensionnel) et des conditions expérimentales très simples.

1.6.3. Passage d'une modélisation monodimensionnelle à une approche bidimensionnelle

Dans une seconde étape on considérera les divagations latérales de l'écoulement. Les dépôts latéraux seront ainsi pris en considération. Il sera alors possible d'aborder une question déjà largement débattue :

l'étude filaire du transport solide correspond-t-elle aux processus naturels ou est ce que l'ajout d'une dimension introduit d'autres phénomènes?

Les expérimentations seront réalisées de façon à ce que la morphologie "élémentaire" d'un cours d'eau puisse se développer, c'est à dire avec une largeur suffisante pour que l'écoulement ne soit plus limité latéralement et que la longueur efficace du canal soit supérieure à la longueur caractéristique des tresses. Par rapport à l'étape précédente, seule la largeur du canal sera modifiée. La confrontation des mesures avec celles obtenues sur canal étroit mettra en lumière la spécificité des écoulements monodimensionnels.

1.6.4. Effets des variations temporelles et de l'apport amont de matériaux sur une zone de dépôt

L'étape suivante consistera à augmenter encore la complexité des phénomènes en étudiant la dynamique d'une vaste zone de dépôt soumise à une crue. Cette approche permettra de prendre en considération les évolutions longitudinales ainsi que de comprendre l'effet des structures morphologiques quand celles ci ont toute liberté pour se développer.

Les évolutions à grande échelle uniquement dues à l'écoulement seront alors mises en évidence. D'autre part, en simulant une crue et en injectant des matériaux dans l'écoulement, cette reproduction sur modèle réduit sera aussi fidèle que possible aux sollicitations subies par un cône de dépôt durant une forte crue. Elle préparera le passage à l'étude des lits torrentiels de terrain.

1.6.5. Analyse de la complexité des lits naturels

La dernière phase de cette analyse consistera à confronter les observations sur modèles aux lits torrentiels réels. Cette démarche sera constituée des étapes suivantes :

- Définition d'un protocole adapté de mesure de granulométrie,
- Mise au point d'une méthodologie d'approche des lits torrentiels par prise en considération de plusieurs échelles de temps et d'espace,
- Etablissement d'une typologie des éléments morphologiques. Cette typologie décrira les différentes structures morphologiques, mais proposera aussi une explication de leur formation et de leur rôle dans la dynamique torrentielle.
- Mise en évidence de tendances de fonctionnement basées sur la confrontation entre les essais sur modèle réduit et les mesures de terrain,
- Confrontation d'une approche hydrologique sommaire avec les granulométries du lit.

Il sera alors possible, dans le cadre des études de cas, d'avoir une approche beaucoup plus objective de la dynamique torrentielle en confrontant les particularités d'un torrent aux tendances générales observées.

D'autre part, cette démarche permettra une meilleure adaptation des formulations existantes (basées sur des observations de modèles réduits) à l'objet des études (torrent naturel).

1.7. Conclusion

Nous avons présenté ci dessus le fil directeur de cette étude. S'y ajoute une étude bibliographique (chapitre 2) et une étude des moyens de mesures utilisés. La démarche retenue est donc la suivante :

- Etude du tri granulométrique dans des conditions aussi simples que possible (modèle ponctuel). Cette approche permet une première quantification des phénomènes élémentaires (chapitre 4).
- Mise en lumière de l'influence des divagations dans le cas du charriage torrentiel (chapitre 5),

- Observation des phénomènes sur un modèle réduit de grande taille lors de la reproduction de crues complètes (chapitre 6),
- Confrontation des résultats obtenus aux observations de terrain et mise en évidence de tendance de fonctionnement des torrents naturels (chapitre 7).
- Enfin une conclusion (chapitre 8) regroupe les différents résultats obtenus, les situe par rapport aux phénomènes d'ensemble et dégage des perspectives de recherche.

Il sera ainsi possible de mieux comprendre et hiérarchiser les différents phénomènes se produisant en torrent et de mieux connaître la formation d'un lit torrentiel en vue de son interprétation.

1 - Introduction - Généralités

2 - Analyse bibliographique

Sommaire

2.1. Objectifs.....	48
2.2. Typologie des transports solides torrentiels.....	50
2.2.1. Les laves torrentielles.....	51
2.2.2. Le charriage.....	53
2.2.3. La suspension.....	55
2.2.4. Les écoulements hyperconcentrés.....	58
2.2.4.1. le charriage hyperconcentré.....	58
2.2.4.2. la suspension hyperconcentrée.....	59
2.2.5. Synthèse.....	60
2.3. Conditions d'écoulement.....	61
2.3.1. Approche classique.....	61
2.3.2. Influence de la submersion relative.....	62
2.3.3. Rôle du nombre de Froude.....	67
2.3.4. Synthèse.....	69
2.4. Début de mouvement des particules.....	70
2.4.1. Définition du seuil de transport.....	70
2.4.2. Approches classiques.....	71
2.4.3. Influence de la pente.....	74
2.4.4. Rôle de la submersion relative.....	76
2.4.5. Synthèse.....	78
2.5. Capacité maximale de transport.....	79
2.5.1. Approche classique.....	80
2.5.2. Particularité des Fortes pentes.....	84
2.5.3. Influence sur les conditions d'écoulement.....	90
2.5.4. Synthèse.....	92
2.6. Effet de la granulométrie étendue sur les phénomènes torrentiels - tri granulométrique.....	93
2.6.1. Approches.....	93
2.6.2. Début de mouvement des particules.....	93
2.6.3. Transport solide.....	97
2.6.4. Synthèse.....	100
2.7. Morphologie.....	101
2.7.1. Notion de débit dominant.....	101
2.7.2. Différentes approches.....	103
2.7.2.1. approches empiriques.....	103
2.7.2.2. approches énergétiques.....	104
2.7.2.3. nombre de Froude.....	104
2.7.2.4. variance minimale.....	104
2.7.2.5. Approche microscopique.....	105

2.7.3. Cas de l'approche de la puissance unitaire d'écoulement	107
2.7.3.1. théorie générale	107
2.7.3.1.1. introduction	107
2.7.3.1.2. minimum de dissipation de puissance	108
2.7.3.1.3. minimum de puissance unitaire d'écoulement P.U.E.	108
2.7.3.2. applications morphologiques	109
2.7.3.2.1. introduction	109
2.7.3.2.2. méandres	109
2.7.3.2.3. alternances seuil / mouille	109
2.7.3.2.4. proportions de la section transversale	109
2.7.3.2.5. variation de rugosité	111
2.7.3.2.6. débit liquide	111
2.7.3.3. applications annexes	111
2.7.4. Particularité des torrents	112
2.7.5. Profil en long	113
2.7.6. Dessin en plan du lit	115
2.7.7. Formes du lit	117
2.7.7.1. approche classique	117
2.7.7.2. les dunes à fortes pentes	121
2.7.8. Les marches d'escaliers	123
2.7.8.1. description	123
2.7.8.2. formation	124
2.7.8.2.1. Le renversement de la vitesse	124
2.7.8.2.2. L'approche énergétique	124
2.7.8.2.3. Le transport en nappes	124
2.7.8.2.4. Les antidunes	124
2.7.8.3. influence sur l'écoulement	126
2.7.8.4. incidence sur le transport solide	127
2.7.9. Pavage	129
2.7.9.1. différents types de pavage	129
2.7.9.2. déficit de l'alimentation en matériaux	131
2.7.9.3. effet des apports amont de matériaux	132
2.7.9.4. stabilité de l'armure	134
2.7.9.5. dynamique du pavage	136
2.7.9.6. Conclusion	137
2.7.10. Synthèse	137
2.8. Liste des figures	141

2.1. Objectifs

Quels phénomènes se produisent dans un torrent ?

Cette question, qui semble si élémentaire, ne connaît pas de réponse triviale. En effet, suivant les débits liquides, la nature des matériaux constitutifs, la fourniture en matériaux, l'historique des crues... des phénomènes très différents ou mal connus se produisent. Or leur étude est particulièrement complexe car, d'une part l'énergie dont dispose l'écoulement est très importante à cause de la pente et d'autre part il est difficile de trouver une échelle pour un "élément représentatif" de lit.

Ce chapitre est donc destiné à apporter des éléments de réponse sans pour autant fournir d'explication définitive car la connaissance des phénomènes est encore extrêmement sommaire. Il s'agit surtout de présenter les différentes hypothèses formulées, afin de mieux percevoir la nature des phénomènes.

L'objectif de ce chapitre est de mieux cerner les particularités de la morphologie générée par le charriage torrentiel à partir d'une analyse des travaux déjà réalisés dans ce domaine.

Il ne s'agit pas de réunir une collection de formules mais plutôt de situer le niveau actuel de compréhension des phénomènes liés au charriage torrentiel. En effet, ce préambule est nécessaire car, sous des noms semblables, les torrents dissimulent des processus très différents de ceux habituellement rencontrés en rivières.

D'autre part, le charriage torrentiel est réellement difficile à appréhender à cause de l'interdépendance des paramètres. L'ensemble lit + écoulement dispose donc d'une grande liberté de configuration et peut permettre un fonctionnement instable, les deux éléments pouvant trouver plusieurs zones de fonctionnement temporairement stables.

Il est donc nécessaire, si l'on s'intéresse à la morphologie, de comprendre les mécanismes du transport solide et surtout le phénomène de début de transport. Cette étude bibliographique est donc construite autour des aspects suivants :

- **Délimitation des différents types de transport solide.** En effet la forte pente permet à une multitude de processus de trouver l'énergie nécessaire à leur développement.
- **Etude des conditions d'écoulement en torrent.** Il apparaît que deux particularités se conjuguent pour développer un écoulement aux caractéristiques particulières : la forte pente et surtout une faible submersion relative (rapport h/d).

On trouvera la liste des symboles utilisés, leur dimension et leur signification dans les premières pages de ce travail.

- **Début de mouvement des grains.** C'est ce phénomène qui est directement à l'origine de l'état d'équilibre du torrent et donc qui explique en grande partie la morphologie locale telle que l'on peut l'observer.

- **Le transport solide**, même dans le cas des très fortes crues, est lui aussi, important pour une approche morphologique car il explique¹ les caractéristiques globales de la morphologie du lit.

Finalement, c'est l'ensemble des caractéristiques du charriage torrentiel qu'il est nécessaire de connaître. Une caractéristique particulière semble être à la base de la plupart des phénomènes : **le tri granulométrique** des éléments.

Cette caractéristique, déjà importante en rivière, devient essentielle dans le cadre des torrents à cause de la très forte étendue granulométrique qui les caractérise. Un paragraphe est donc uniquement consacré au tri granulométrique.

Enfin, les études concernant **la morphologie** torrentielle sont détaillées dans le dernier paragraphe. Il est composé des points suivants :

- méthodes d'approche et théories concernant la morphologie fluviale,
- particularité de la morphologie torrentielle et définition des éléments la composant,
- inter-action entre la morphologie et le charriage torrentiel.

L'étude de chaque phénomène est résumée dans un paragraphe de synthèse à la fin de chaque approche bibliographique.

¹ Il y a deux types de relation entre transport solide et morphologie. La première, "mécanique", traduit le fait que c'est le transport solide, en déplaçant les grains, qui forme les structures morphologiques. C'est celle qui est retenue ici.

La seconde, plus difficile à mettre en évidence, correspond à l'influence du transport solide sur le type de morphologie adoptée par le cours d'eau. Cet aspect important sera abordé ultérieurement lors de l'étude des différentes morphologies.

2.2. Typologie des transports solides torrentiels

En torrent, on distingue plusieurs types de transport qui se caractérisent par des processus physiques, des modes de déplacement et des traces morphologiques différentes. La définition rigoureuse de ces processus, pourtant indispensable, n'est toujours pas établie et se heurte à deux difficultés qui témoignent bien des lacunes actuelles :

- les processus de transport sont mal connus en dehors de leurs conséquences morphologiques (absence d'observations de crues naturelles),
- Le passage d'un processus à l'autre est souvent continu, sans limites nettes. Par exemple la distinction rigoureuse entre charriage hyperconcentré et lave torrentielle n'a pas encore pu être établie.

Ainsi, LARRAS (1972) opère la distinction suivante entre charriage et suspension, dans le cadre d'une approche classique (faible pente, granulométrie resserrée et forte submersion relative) :

"On dit qu'il y a charriage quand il y a progression de tout ou partie des granulats dans le sens du courant en glissant ou en roulant (ou bien sautant légèrement) sur le fond.

On dit, par contre, qu'il y a saltation quand il y a une suite d'envols et de retombées successifs à des distances relativement appréciables.

On dit, enfin, qu'il y a suspension quand les granulats progressent dans le sens du courant au sein même du liquide sans jamais retomber, sauf très épisodiquement, sur le fond.

La distinction entre ces trois types de transports procède donc d'éléments subjectifs(...). Mais les hydrauliciens ne divergent généralement pas trop dans leur appréciation des transports par charriage et saltation d'une part, des transports par suspension de l'autre, dans chaque cas particulier."

Ce consensus sur des critères subjectifs est établi de la même façon dans le transport solide torrentiel, en particulier à la jonction entre charriage hyperconcentré et laves torrentielles. Cependant, dans les torrents, les phénomènes sont beaucoup plus variés et nettement moins connus. Ainsi, les zones de recouvrement sont plus larges et laissent encore une place importante à l'appréciation personnelle.

La figure suivante (d'après MEUNIER 1991) permet d'avoir une vue d'ensemble des phénomènes se produisant en montagne et des disciplines s'y rattachant. Il apparaît que l'hydraulique torrentielle se situe à la charnière entre deux disciplines très différentes : l'hydraulique et la mécanique des sols.

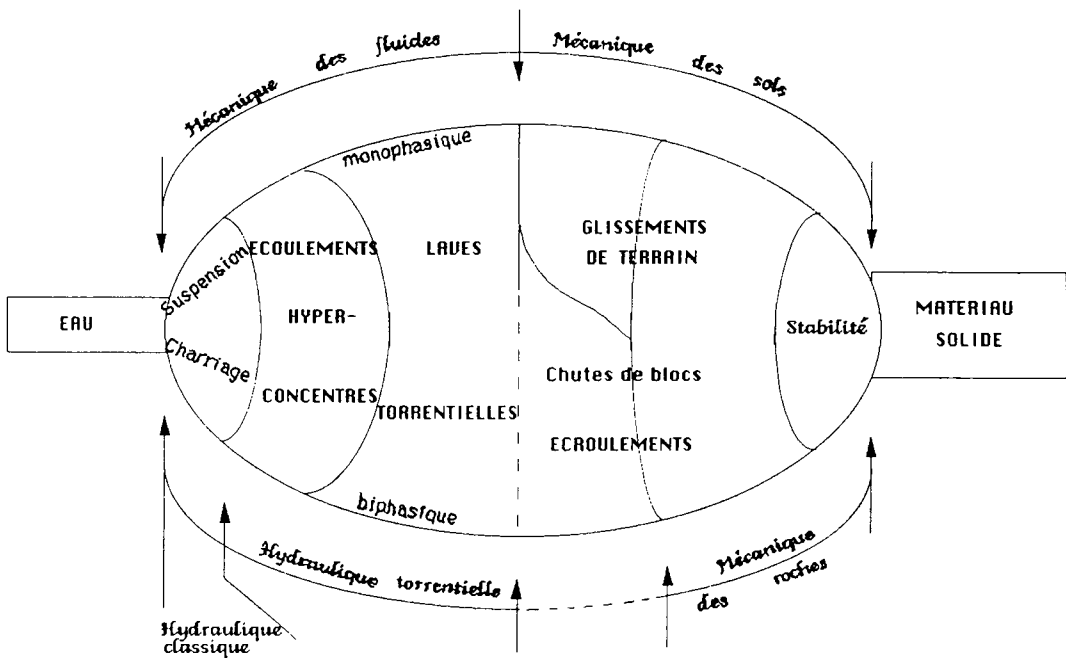


Figure 2-1 : Les phénomènes torrentiels et les disciplines s'y rattachant (d'après MEUNIER 1991).

Il en découle qu'une difficulté importante peut être l'utilisation de concepts liés à l'hydraulique classique alors qu'ils sont sans réalité physique dans le cadre des torrents.

Les trois mécanismes de bases (lave torrentielle, charriage, suspension) vont maintenant être présentés puis les phénomènes hybrides seront décrits. Les caractéristiques physiques des phénomènes sont approchées mais aussi, suivant l'approche anglo-saxonne, les caractéristiques morphologiques de chaque processus.

2.2.1. Les laves torrentielles

Par lave torrentielle on désigne un phénomène intermédiaire entre le charriage et le glissement de terrain. La difficulté est renforcée par la variation des propriétés des laves torrentielles non seulement d'un torrent à l'autre mais aussi d'une lave à l'autre en fonction des matériaux qui lui sont fournis.

La figure suivante montre un schéma de l'évolution d'une lave torrentielle. Il apparaît nettement qu'il s'agit d'un élément indépendant parcourant un lit de torrent et non pas d'un phénomène continu. Le régime permanent n'a alors plus de sens.

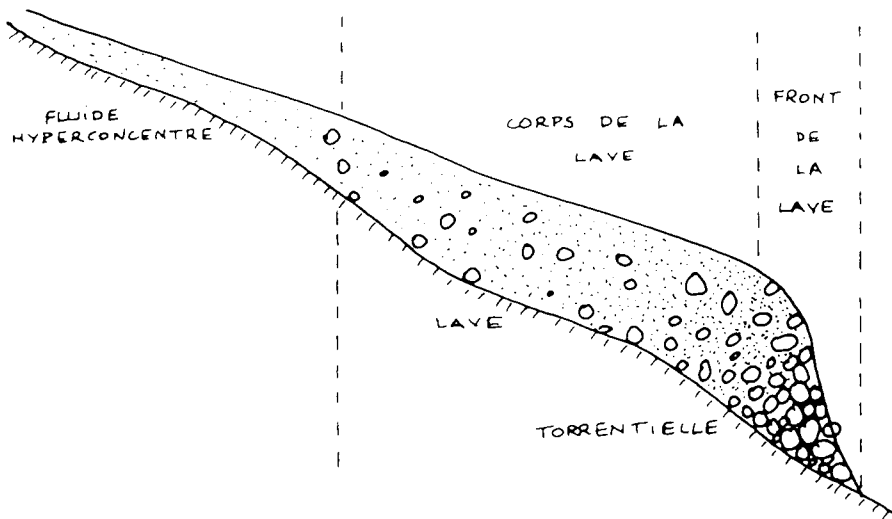


Figure 2-2 : Section longitudinale d'une lave torrentielle (d'après MEUNIER 1991).

Il s'agit d'un domaine très vaste et SAURET (1986) dans sa synthèse bibliographique indique qu'il existe au moins 6 termes anglo-saxons pour désigner les phénomènes qualifiés de "coulée" en français.

Les laves torrentielles peuvent être définies suivant plusieurs critères :

- fonctionnement par bouffées indépendantes. Ce critère peut être provoqué par des causes externes, mais il semble qu'il corresponde à un fonctionnement intrinsèque de l'écoulement,
- concentration en matériaux très élevée,
- très faible tri granulométrique dans les processus d'érosion/dépôt,
- écoulement monophasique,
- arrêt en masse de la coulée.

En fait, aucun de ces critères n'est - à lui seul - satisfaisant ni vraiment caractéristique des laves torrentielles. Ainsi la prise en considération d'un fluide monophasique reste éloignée de la réalité puisque la présence d'un tri granulométrique au sein de la coulée est couramment admise. De plus, des écoulements biphasiques sont assimilés à des laves car ils en présentent les caractéristiques : on parle alors de "laves granulaires".

Finalement, c'est l'indépendance des bouffées de laves entre elles et l'unicité de la vitesse de tous les éléments du mélange qui semblent les plus caractéristiques.

La description complète du fonctionnement des laves du torrent du Pousset a été réalisée par LEFEBVRE (1979). Il s'agit du cas classique avec une courbe granulométrique très étendue et la présence importante de fines. Dans d'autres cas, des phénomènes identiques semblent se produire alors que les matériaux fins sont pratiquement absents. La figure ci-dessous montre une section transversale caractéristique du lit d'un tel torrent :

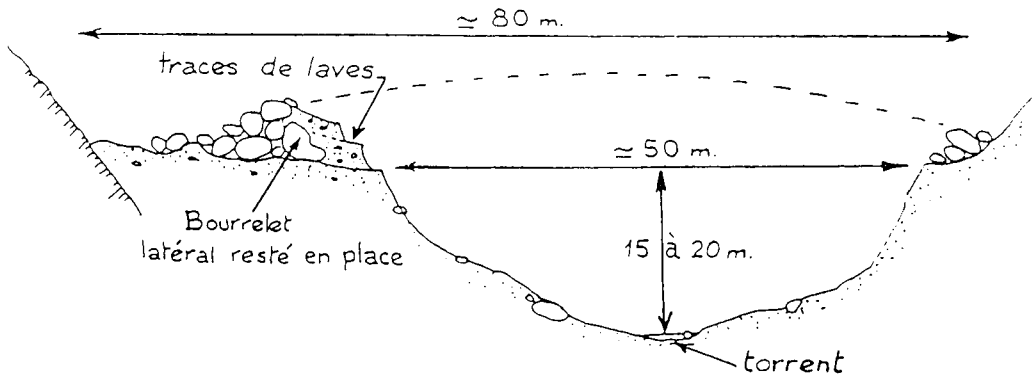


Figure 2-3 : Profil transversal d'un lit de torrent à lave (d'après LEFEBVRE - 1979)

Les caractéristiques morphologiques généralement observées sont les suivantes :

- profil en travers en arc de cercle relativement constant le long du chenal,
- présence de bourrelets de rive réguliers avec une granulométrie très étendue, et une concentration en matériaux grossiers plus marquée dans la zone supérieure,
- absence de structures longitudinales ou transversales dans le lit,
- arrêt de la coulée dans sa globalité avec un front de lave généralement en arc de cercle et constitué d'éléments plus importants,
- présence de blocs cyclopéens "oubliés" par la coulée en particulier au niveau du raccord gorge/cône,

Chaque lave ayant des caractéristiques d'écoulement particulières, il est normal que cette diversité se retrouve dans la morphologie du lit.

2.2.2. Le charriage

On retrouve là un élément plus classique de l'hydraulique fluviale. Le charriage désigne alors le transport sur le fond d'éléments non cohésifs. Dans ce cas, chaque élément transporté subit les forces induites par l'écoulement, par le fond - qui peut être considéré comme fixe - et par la gravité. Il s'agit donc du déplacement d'une phase (le grain considéré) dans une autre phase (l'écoulement). La figure suivante schématise un tel phénomène :



Figure 2-4 : Schéma d'un lit soumis à un transport solide par charriage.

Cependant, dans le cas des torrents le charriage prend de nombreuses formes, depuis le glissement ou le roulement de quelques éléments isolés sur le fond jusqu'aux écoulements hyperconcentrés.

On peut définir la limite entre charriage "classique" et écoulement hyperconcentré en fonction de la couche de matériaux transportés : lorsqu'il y a une seule épaisseur de matériaux, on considère qu'il s'agit de charriage à faible concentration, sinon on parlera d'écoulement hyperconcentré. Cette distinction semble a priori conforme aux notions de contrainte inter-granulaire. On considère ici uniquement le premier type de transport dans un premier temps.

Alors que, dans le cas des laves ou de la suspension, la distinction entre lit et écoulement est évidente, pour le charriage il n'en est rien. Un élément progressant par bonds, il appartient tantôt au lit tantôt aux éléments transportés. Ainsi la notion de fond devient ambiguë et il s'agit de savoir si l'on considère les éléments temporairement immobiles en contact avec l'écoulement ou les éléments qui ont été en contact avec l'écoulement durant la crue mais qui n'ont pas bougé pendant celle-ci. Cette distinction prend toute son importance lorsque l'on parle de "pavage mobile" (SUZUKI & KATÓ - 1989).

C'est sans doute pour le charriage classique que la morphologie est la plus diverse. On peut alors observer suivant les cas :

- une couche pavée,
- une alternance de seuils et de mouilles formant des marches d'escalier,

- des dépôts avec un tri granulométrique très net,
- un chenal au lit globalement plat,
- des variations très locales de granulométrie,

Ces caractéristiques seront considérées en détail ultérieurement. Ils sont d'autant plus marqués que l'écoulement se trouve proche du seuil de transport.

2.2.3. La suspension

Pour les torrents comme pour les rivières, la turbulence maintient des éléments fins en suspension. Les concentrations rencontrées sur les torrents sont souvent plus élevées qu'en rivière. Cette situation semble provenir de la fourniture en sédiments plutôt que des conditions d'écoulement : une proportion élevée de terrains très érodables est d'autant plus facilement atteinte que le bassin versant est de faible dimension. D'autre part, la taille des éléments transportés, au contraire du débit solide en suspension, est directement liée aux conditions hydrauliques. Elle est donc nettement plus élevée en torrent.

Lorsque la concentration devient très importante (plusieurs centaines de grammes par litre) on parle de suspension hyperconcentrée et le comportement de l'écoulement se rapproche de celui des laves torrentielles. Ces fortes charges en éléments semblent avoir un effet sur le profil de vitesse et la capacité de transport (RICKENMANN 1989).

Les seules traces morphologiques liées à la suspension sont réduites à quelques détails tels que les laisses de crues. Il semble que l'influence de la suspension sur la fraction fine de la granulométrie est importante.

En rivière il est possible de savoir à partir de quelle taille de grains le transport s'effectue en suspension. LARRAS (1972) propose deux formules établies avec de très faibles pentes et des dunes se propageant sur le lit (donc un nombre de Froude réduit). Il cite un critère datant de la première moitié du XIX^{ème} siècle :

$$U^2 = 25 d \dots\dots\dots (2-1)$$

Par rapport à ces formulations empiriques, une approche plus physique est basée sur le calcul de la vitesse de chute des particules (en eau calme). Plutôt que la classique formule de STOCKES, LIN (1993) préfère celle de GONTCHAROF établie à partir de particules solides naturelles :

$$w = \frac{1}{24} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{g d^2}{\nu} \dots\dots\dots (2-2)$$

Cependant, cette expression n'est valable que pour $d < 80 \mu\text{m}$. En la combinant avec l'expression de BAGNOLD et WANG qui ont établi qu'il n'y a suspension que si :

$$U I > w \dots\dots\dots (2-3)$$

LIN peut alors en conclure que :

$$d_c = \sqrt{24 \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{\nu U I}{g}} \dots\dots\dots (2-4)$$

avec d_c plus gros diamètre pouvant être transporté en suspension.

Cependant, il apparaît que le nombre de Reynolds du grain est un paramètre important et LIN, à la suite d'une étude bibliographique, propose une autre formulation établie par ZHANG (INPHEEIIWH 1980) à la suite d'une étude théorique et valable pour les régimes laminaires, transitoires et turbulents :

$$w = \sqrt{(13.95 \frac{v}{d})^2 + 1.09 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} gd} - 13.95 \frac{v}{d} \dots \dots \dots (2-5)$$

Lorsque le nombre de Reynolds du grains est supérieur à 1000 (VALEMBOIS proposerait 500), il est possible d'exprimer la vitesse de chute par :

$$w = \sqrt{\frac{10gd_{50} \rho_s - \rho}{3 \rho}} \dots \dots \dots (2-6)$$

Il suffit ensuite de comparer cette vitesse de chute à la vitesse de friction. Il y a alors suspension si

$$U_* \geq w \dots \dots \dots (2-7)$$

Il semble intéressant d'effectuer une comparaison de ces différentes formulations dans le cadre d'une crue torrentielle, c'est à dire très en dehors de leur domaine de validité. Seul le premier cas (pente de 5‰ et nombre de Froude de 0.1) correspond au domaine de validité de toutes ces formulations. On obtient alors les résultats suivants :

	conditions hydrauliques				
Pente (%)	0.5%	5.0%	1.0%	10.0%	20.0%
Hauteur d'eau (m)	1	1	1	1	1
Fr	0.1	1	1	1	1
U (m/s)	0.31	3.13	3.13	3.13	3.13
U* (m/s)	0.21	0.70	0.31	0.99	1.40
	Diamètre maxi. des grains maintenus en suspension (m)				
Formule 2-1	3.9E-05	3.9E-03	3.9E-03	3.9E-03	3.9E-03
GONTCHAROF + BAGNOLDS & WANG	8.1E-05	8.1E-04	3.6E-04	1.1E-03	1.6E-03
formule 2-6	8.8E-04	8.8E-03	1.8E-03	1.8E-02	3.5E-02
ZHANG	2.8E-03	1.3E-02	5.5E-03	5.3E-02	1.1E-01

Le calcul de la vitesse a été réalisé (pour les pentes supérieures à 1 %) en considérant un nombre de Froude égal à l'unité. Cette particularité des écoulements en torrent sera abordée dans les chapitres suivants. Dans tous les cas, on a pris $v=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Ces résultats sont regroupés dans le graphique suivant. Il montre clairement que les résultats convergent lorsque les conditions hydrauliques sont peu vigoureuses, mais dès que la pente dépasse 1%, les écarts augmentent entre les formules basées sur la vitesse de l'écoulement (les deux premières), et celles établies à partir de la vitesse de frottement.

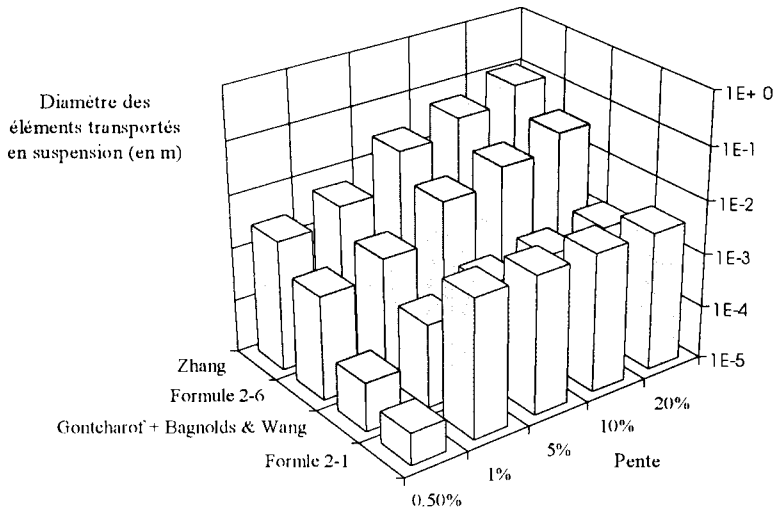


Figure 2-5 : Calcul des diamètres maxi des grains en suspension dans le cas d'une hauteur d'eau de 1 m pour des pentes et avec des formules différentes.

Il semble cependant qu'une approche liée à la pente est beaucoup plus satisfaisante. En effet, les pertes de charge en torrent augmentent linéairement avec la pente, et si la vitesse moyenne n'augmente pas à cause du transport solide, il est légitime de penser que la turbulence, donc la taille des éléments transportés en suspension, croissent avec la pente.

Cependant, lorsque la concentration croît, la turbulence diminue rapidement (BOUVARD 1981). Il y a alors une très forte interaction entre le transport solide par suspension et la nature de l'écoulement. Le problème présente donc une grande difficulté. Cependant, il s'agit d'un problème qui sort du domaine de cet étude.

Pour les fortes pentes, les deux dernières formulations fournissent des résultats très comparables (le rapport des diamètres critiques est constant et seulement de 3). Cet écart provient de la différence de formulation de la vitesse de chute. Cependant, il est difficile, dans le cadre torrentiel d'accorder une grande confiance à ces formules à cause des inconnues sur l'importance de l'effet des rugosités du fond sur la structure de la turbulence en torrent. On peut cependant espérer que ces formulations donnent un ordre de grandeur.

Ce calcul montre l'importance du choix des formules pour une extrapolation. En effet, les résultats sont proches dans le domaine de l'hydraulique fluviale, mais varient de 1 à 1000 lorsque la pente croît.

2.2.4. Les écoulements hyperconcentrés

Sous une même terminologie se cachent deux phénomènes distincts :

- le charriage avec de très fortes concentrations,
- la suspension sous une charge extrême.

Evidemment, ces deux types d'écoulement peuvent être liés comme dans le cas d'une queue de lave torrentielle. Cette combinaison est d'autant plus probable que, comme le montre RICKENMANN (1989), une forte charge en suspension facilite le transport d'éléments plus grossiers.

2.2.4.1. le charriage hyperconcentré

Le charriage hyperconcentré est défini comme un charriage où le transport s'effectue avec une couche de transport d'épaisseur supérieure au diamètre des grains. Etant donné le caractère aléatoire des interactions granulaires, la hauteur de cette couche de transport fluctue rapidement dans le temps. SMART & JAEGGI (1983) en observant leurs essais considèrent que "*la distinction commune entre charriage et suspension n'est plus admissible*", les éléments transportés n'étant plus en contact avec le lit, indépendamment de leur taille.

Une autre définition du charriage hyperconcentré est plus globale : on parle de transport hyperconcentré lorsque le transport solide modifie les conditions hydrauliques. SMART & JAEGGI ont ainsi montré la différence entre la hauteur d'eau et la hauteur du mélange eau + sédiments. Ils montrent ainsi que le transport solide est assez influent pour qu'à débit liquide constant, la hauteur de mélange augmente lorsque la pente s'accroît.

La complexité de ce type de transport réside en partie dans cette influence du transport solide sur l'écoulement. Il s'agit d'un phénomène hybride :

- Du charriage il a les caractéristiques suivantes :
 - écoulement multi-phasique,
 - vitesses différentes de l'eau, des matériaux et des ondes de débit solide,
- Mais il présente des points communs avec les laves :
 - fonctionnement par bouffées,
 - très faible tri granulométrique,

Ainsi, TAKAHASHI (1987) a proposé le terme de lave torrentielle immature : "*immature debris flow*."

Ce type de transport, dont la définition est très vague, est encore peu connu. LARSEN (1990) a observé, sur modèle réduit, l'écoulement dans un conduit de vidange de barrage (concentration en sédiment d'environ 10 %) avec une granulométrie dispersée. Malgré l'absence de surface libre ses remarques sur les couches de transport à proximité du lit (formé par des sédiments) sont intéressantes :

- l'épaisseur de la couche de transport est constante malgré la variation des conditions hydrauliques (diminution de la section),
- cette épaisseur est proportionnelle au débit solide,

- la vitesse des grains des couches supérieures est de l'ordre de 80 % de celle de l'eau,
- les particules près du fond se contentent de vibrer,
- en cas d'arrêt brutal de l'écoulement, l'épaisseur de la couche est réduite de moitié,
- la concentration dans la couche mobile décroît linéairement avec la hauteur,
- la couche stationnaire la plus haute serait compactée par les matériaux transportés.

RICKENMANN (1989) considérant la contrainte de cisaillement adimensionnelle τ_* ($\tau_* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)d} = \frac{\rho R i}{(\rho_s - \rho)d}$) situe un changement de comportement lorsqu'elle dépasse 0.4 (c'est à dire 7 fois la valeur critique de Shields). Il remarque que cela correspond à une épaisseur importante de la couche de transport d'environ 10% de la hauteur totale.

Les "dunes à forte pente" constituent une caractéristique de ce type d'écoulement. MIZUYAMA (1977) les décrit comme des dunes avec un déplacement type "débris flow". Il remarque que de telles structures engendrent une ségrégation granulométrique très marquée et sont constituées d'une pente faible à l'amont (9 à 13%) et beaucoup plus forte dans la zone de dépôt aval (18 à 21%). Il indique d'autre part que ce type de phénomène n'est possible qu'avec une granulométrie étendue, considérant même que la hauteur de la dune croît avec l'étendue granulométrique. Ces structures sont étudiées dans le paragraphe 6.3.3.

2.2.4.2. la suspension hyperconcentrée

Il s'agit des cas où l'effet des matériaux en suspension devient prépondérant dans le comportement du fluide. C'est le cas par exemple des écoulements dans certains fleuves chinois ou à Draix². Dans le premier cas, la concentration est telle qu'elle induit une irrégularité du débit.

JEFFRY (1987) a réalisé des essais concernant ce type d'écoulement et obtient un profil de vitesse plus régulier et un écoulement plus laminaire que pour de l'eau claire. Les critères de distinction entre lave et suspension hyperconcentrée sont principalement la rhéologie du fluide et la concentration. Une importante étude bibliographique réalisée à ce sujet par BORGES (1993) montre que la concentration en matériaux est de loin le principal paramètre explicatif, mais il est difficile de dégager un autre paramètre pour définir la limite de validité du comportement Newtonien.

² Il s'agit d'un ensemble de bassins versants expérimentaux situé dans les Alpes de Haute-Provence et destiné à étudier le transport solide dans les marnes noires.

2.2.5. Synthèse

Finalement, de nombreux processus se produisent en torrent. Or ils peuvent apparaître successivement dans un même torrent et qu'ils marqueront d'autant plus la morphologie qu'ils sont récents. Il faut donc être extrêmement prudent lors de toute "lecture" morphologique.

D'autre part, l'absence de frontière entre les phénomènes, la difficulté de les observer, font qu'ils sont mal connus, et surtout qu'il n'a pas encore été défini de moyen d'approche théorique acceptable.

Pour les laves torrentielles cependant, l'approche rhéologique semble être unanimement reconnue, et est particulièrement prometteuse. Au contraire, le charriage torrentiel ne laisse entrevoir pour l'instant aucune approche aussi satisfaisante, et il est nécessaire d'essayer plusieurs voies pour arriver à cerner le phénomène.

Comme le montrent les paragraphes suivants, la méthode d'investigation usuellement adoptée consiste à utiliser les connaissances acquises en rivière et à les adapter au contexte torrentiel.

2.3. Conditions d'écoulement

2.3.1. Approche classique

Il est indispensable, dans l'étude du transport solide (et en particulier du seuil de début de transport), de considérer les conditions hydrauliques à proximité des grains puisque c'est l'écoulement qui est à l'origine du mouvement des particules.

Pertes de charge et distribution de vitesse sont évidemment liées, car la première est le fruit de l'intégration de la seconde.

Pour des conditions hydrauliques classiques, la plupart des auteurs considèrent une distribution logarithmique des vitesses suivant KEULEGAN (1938) ce qui est facilement démontrable à proximité de la paroi pour un écoulement entièrement rugueux. BATHURST (1982) a montré que cela restait encore vrai pour les rivières avec une bonne précision, l'effet de la surface libre restant négligeable. On a alors :

$$\frac{U(y)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \dots\dots\dots(2-8)$$

La vitesse de frottement est obtenue à partir de la contrainte de cisaillement :

$$U_* = \sqrt{\tau_0/\rho} = \sqrt{ghI} \dots\dots\dots(2-9)$$

Les pertes de charge d'un cours d'eau sont décrites par une relation permettant de déterminer la vitesse moyenne d'un écoulement. C'est une expression plus globale liée à la distribution de vitesse. Pertes de charge et profil de vitesse étant liés, la démarche la plus naturelle consiste à intégrer le profil logarithmique de KEULEGAN ce qui aboutit à la définition d'un nouveau paramètre k_s . BAZIN a obtenu :

$$\frac{U}{U_*} = a + \frac{2.3}{\kappa} \ln\left(\frac{R}{k_s}\right) \dots\dots\dots(2-10)$$

k_s correspond alors à la rugosité de la surface du lit.
 a est une constante numérique.

La formulation la plus générale est issue de l'équation de DARCY-WEISSBACH :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{\sqrt{gRI}} \dots\dots\dots(2-11)$$

où f est le coefficient de DARCY-WEISSBACH.

En France, on considère plutôt l'équation de Manning-Strickler qui s'écrit :

$$U = K R^{2/3} I^{1/2} \dots\dots\dots(2-12)$$

K coefficient de rugosité de Strickler

Ces deux coefficients sont liés par l'expression :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = K g^{-1/2} R^{1/6} \dots\dots\dots(2-13)$$

La difficulté consiste à déterminer la valeur de K , f ou k_s . On considère généralement que les frottements sont issus de la rugosité de peau. Ainsi, les coefficients définis précédemment sont déterminés à partir de la courbe granulométrique des matériaux du lit. On utilise en général un diamètre "représentatif" dans une formule empirique. Par exemple

$$K = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \dots\dots\dots (2-14)$$

BAZIN a déterminé la valeur de k_s , comme égale à d_{50} . On considère souvent $k_s = d_{90}$.

Ces expressions sont satisfaisantes pour un lit plat et rectiligne, une submersion relative importante, une pente faible mais deviennent inadaptées dans les autres cas. C'est pourquoi de multiples auteurs ont modifié les coefficients, les diamètres représentatifs mais sans amélioration sensible en dehors de la fourchette de conditions hydrauliques auxquelles elles correspondent.

L'influence des formes du lit sur les conditions d'écoulement est importante. Elle sera traitée au chapitre concernant la morphologie, afin d'avoir une vue globale de l'effet des structures morphologiques sur le comportement du torrent.

CAO (1985) étudiant le cas des torrents a effectué une étude dimensionnelle pour déterminer les critères influents. Il en a retenu trois :

- la submersion relative R/d ,
- le nombre de Froude Fr ,
- la concentration de l'écoulement en sédiments. Ce point particulier sera traité au chapitre sur le transport solide.

2.3.2. Influence de la submersion relative

C'est vraisemblablement cet élément qui explique la différence entre la distribution classique de vitesse et la situation dans les torrents.

BATHURST (1978) lors d'études sur la submersion relative a défini trois zones :

1. la rugosité du lit est à faible échelle si $15 < h/d$. On peut alors appliquer les relations de pertes de charge classiques en négligeant l'écoulement sous le sommet des particules.
2. pour une valeur intermédiaire ($4 < h/d < 15$) les relations classiques ne sont plus valables car une proportion substantielle de l'écoulement se produit entre les grains du lit. Les vitesses sont plus faibles et plus homogènes dans cette zone.
3. lorsque $h/d < 4$, l'écoulement est dépendant des gros éléments, de leur position, de leur forme et de leur volume. Pour une pente suffisante, le nombre de Froude oscille autour de l'unité. C'est le cas le plus courant en torrent.

Une première approche consiste à considérer les plus gros éléments du lit. Ainsi, LIMERINOS (1970) a établi une formule empirique sur la base de mesures sur 11 rivières torrentielles en Californie. Il obtient :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 3.38 + 5.75 \ln\left(\frac{R}{d_{84}}\right) \dots\dots\dots(2-15)$$

Un résultat intéressant de son étude est la meilleure corrélation obtenue avec le d_{84} qu'avec le d_{50} montrant ainsi l'influence prépondérante des éléments les plus grossiers.

Il s'agit là d'une formulation très classique. Ainsi, CARION (1986) a réalisé une comparaison des formules pouvant être adaptées aux lits torrentiels. Il a comparé les formules aux mesures suivantes pour discerner une formule capable de rendre compte des pertes de charge en torrent :

- mesures réalisées par GRIFFITHS (1981) sur des rivières néo-zélandaises. La pente était comprise entre 0.08 et 1.5 %, la profondeur entre 0.24 et 7 m et le d_{90} entre 0.24 et 31 cm.
- mesures réalisées en canal par BATHURST & al. avec des pentes comprises entre 2 et 8 % et une largeur de 1.168 m.
- mesures obtenues par SMART & JAEGGI avec des pentes allant jusqu'à 20 %.

Il obtient que la formule proposée par BATHURST (1978) est la plus pertinente. Elle a été obtenue à partir de mesures sur 16 rivières dont la profondeur varie entre 0.1 et 1.3 m, la pente entre 0.4 et 5 %. Elle s'écrit :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 4 + 5.62 \ln\left(\frac{R}{d_{84}}\right) \dots\dots\dots(2-16)$$

La similitude avec l'équation de LIMERINOS est évidente. De même, HEY (1979) a proposé :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 3.02 + 5.75 \ln\left(\frac{R}{d_{84}}\right) \dots\dots\dots(2-17)$$

alors que GRIFFITHS (1981), pour un lit immobile et une submersion relative (R/d_{50}) comprise entre 5 et 200, propose :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2.15 + 5.6 \ln\left(\frac{R}{d_{50}}\right) \dots\dots\dots(2-18)$$

La multiplication de ces formulations, d'origines diverses, et les résultats relativement bons qu'elles fournissent, indiquent qu'elles sont les mieux adaptées à traduire les pertes de charge dans les rivières torrentielles. De plus, elles présentent l'avantage d'être simples d'utilisation.

Elles ne constituent cependant qu'une approche très grossière de l'écoulement en torrent, et ne peuvent permettre de mieux comprendre le champ de vitesse et son influence sur le transport solide. Il est donc nécessaire de détailler les phénomènes propres aux écoulements en torrent.

ZGHEIB (1990) utilise une approche spécifique aux torrents : l'effet des gros éléments du lit sur l'écoulement est considéré comme la déviation d'un jet. L'écoulement devient "troublé" au-dessus de la sous couche laminaire. Il est alors dominé par des zones de dissipation d'énergie, d'accélération et de décélération, le régime d'écoulement étant tantôt subcritique, tantôt supercritique. La distribution de vitesses prend un caractère entièrement tridimensionnel.

Une telle schématisation correspond bien aux observations que l'on fait sur le terrain, en particulier lorsque la submersion relative est de l'ordre de l'unité. Bien que sa complexité la prive pour le moment de résultats exploitables, une telle démarche est intéressante, même si STÜVE (1990) a montré que l'écoulement se régularisait lors des crues (augmentation de la profondeur relative).

L'importance des grands éléments de rugosité qui bloquent l'écoulement a poussé les chercheurs (MORRIS 1955, HERBICH & SHULITS 1964) à introduire un nouveau concept : la concentration de rugosité. Celui ci est défini comme le rapport de la projection dans le sens de l'écoulement des surfaces des éléments (A_v) à la surface du lit A comme le montre la figure ci dessous :

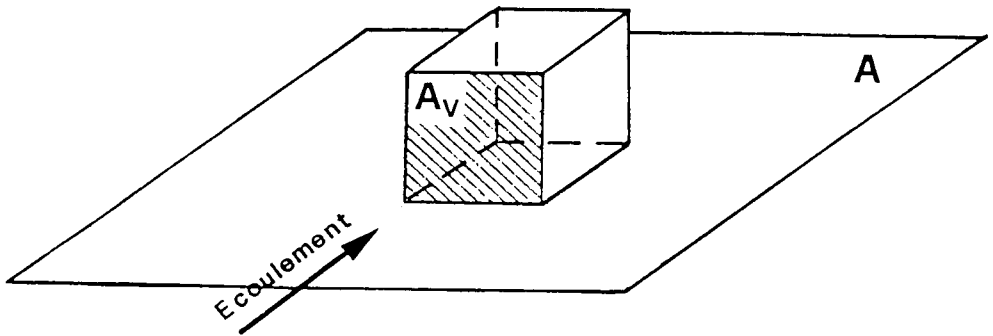


Figure 2-6 : définition de la concentration de rugosité (d'après CAO 1985)

BATHURST (1978) propose de ne considérer que les blocs qui émergent et définit une autre fonction de pertes de charge :

$$\lambda_1 = 0.139 \ln \left(1.91 \frac{d_{84}}{R} \right) \dots \dots \dots (2-19)$$

La formule de résistance s'écrit alors :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \left(\frac{R}{0.365 d_{84}} \right)^{2.34} \left(\frac{B}{h} \right)^{7(\lambda_1 - 0.08)} \dots \dots \dots (2-20)$$

B correspond à la largeur de l'écoulement.

La détermination du coefficient de rugosité est difficile sur le terrain et limite les applications pratiques de ces formules. Cependant elles traduisent bien la réalité physique en montrant clairement l'importance de la submersion relative.

ASHIDA & BAYAZIT (1973) ont montré la présence de zones de séparation en aval des gros obstacles où se produit une très intense turbulence. EGASHIRA & al. (1989) ont largement développé ce principe dans le cas des profils en marches d'escalier. Il sera donc traité dans ce paragraphe.

NAKAGAWA et al. (1989) ont procédé à des mesures expérimentales de profil de vitesse pour une faible submersion relative ($1.3 < h/d < 4.2$) et une pente inférieure à 5%. Les conditions étaient les suivantes :

- canal recouvert de billes de verre de taille uniforme
- granulométrie uniforme et de faible taille ($d=2.97$ cm pour les plus gros éléments). Or il est probable qu'une granulométrie étendue conduirait à des résultats à la fois plus tranchés et plus variables spatialement.
- $I < 0,005$. C'est sans doute la différence majeure avec les torrents.
- $Fr < 0,64$. Conséquence de la condition précédente, l'absence d'écoulement torrentiel ou même critique enlève de l'intérêt à cette approche.

Ils en concluent qu'il existe deux zones :

- une couche inertielle où les phénomènes sont ceux de la "turbulence ordinaire",
- une sous couche rugueuse d'épaisseur 0.2 à 0.4 d qui se caractérise par :
 - des vitesses beaucoup plus uniformes que le profil logarithmique,
 - une intensité de la turbulence qui disparaît près du lit.
 - l'auto corrélation, comme le spectre fréquentiel, montre que les fluctuations de vitesse ont des périodes de l'ordre de la seconde. Les auteurs en concluent que cette sous couche présente une turbulence organisée, dominée par le déclenchement de tourbillons autour des obstacles importants.

L'utilisation d'autres mesures avec des pertes de charge variant spatialement pour créer des courants secondaires permet d'affiner la connaissance de cette sous couche. Elle montre une forte hétérogénéité spatiale de la structure de turbulence.

L'instabilité de cette structure brouille les mesures ponctuelles qui deviennent alors des moyennes spatiales. Ces résultats, extrêmement intéressants sur le plan théorique sont basés sur des expériences encore éloignées des conditions d'écoulement en torrent :

MIZUYAMA (1977) a réalisé des expérimentations à forte pente ($2 \% < I < 10 \%$) sur un lit fixe de graviers naturels d'un diamètre uniforme de 12 mm. Il a mesuré la distribution de vitesses à l'aide d'un tube de PITOT.

La figure suivante montre le résultat des mesures en fonction de la pente et de la submersion relative. Il y a encore une distribution logarithmique mais avec rupture de pente pour $y=0.8$ d . Il apparaît nettement une uniformisation à proximité du lit.

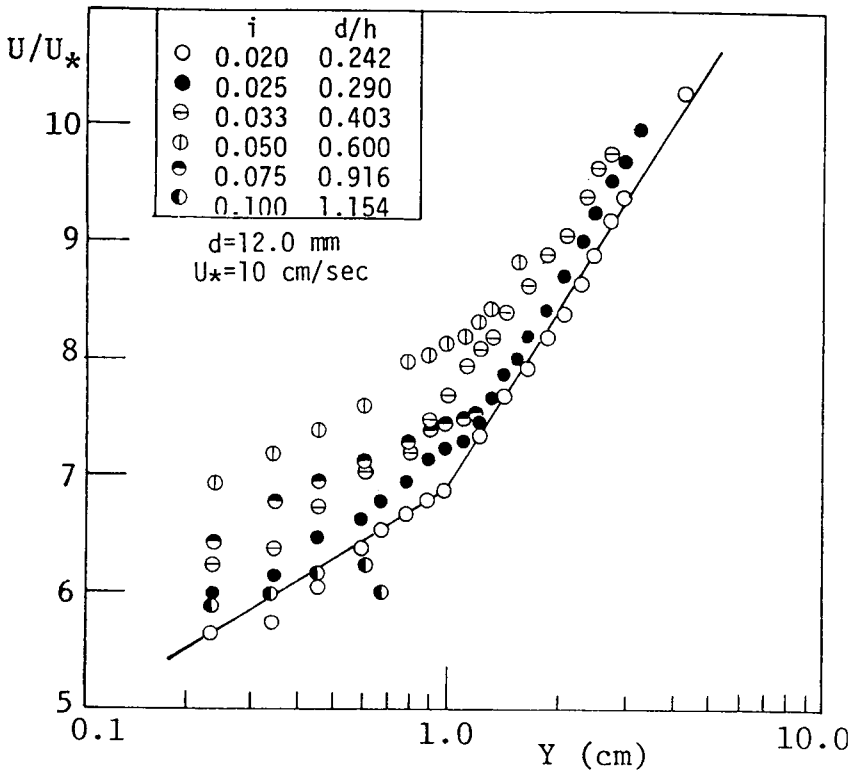


Figure 2-7 : Mesure de distribution de vitesse pour un lit de graviers naturels (d'après MIZUYAMA 1977)

Cette valeur de 0.8 d a déjà été obtenue par YAMAOKA (1962) lors de l'étude de grands éléments de rugosité rectangulaire. Après intégration des profils, MIZUYAMA obtient finalement :

pour $h < \delta$

$$\frac{U}{U_*} = A + 0.87 \ln\left(\frac{y}{\delta}\right) \dots\dots\dots (2-21)$$

pour $h > \delta$

$$\frac{U}{U_*} = A + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{\delta}\right) \dots\dots\dots (2-22)$$

avec $\delta = 0.8 d$ (point du changement de distribution)

Par intégration et utilisation du modèle de sillage établi par YAMAOKA, il arrive à une équation globale de pertes de charge, qui correspond bien à ses données, mais qui est beaucoup trop complexe pour pouvoir être utilisée dans d'autres cas.

D'autre part, MIZUYAMA pose le problème de la situation de l'origine des ordonnées lorsque le diamètre des éléments n'est plus négligeable. Plusieurs auteurs ont abordé la question mais ils proposent des valeurs différentes :

EINSTEIN & ELSAMNI (1949) ont retenu une valeur de 0.2 d entre le sommet des particules et l'origine pour être en conformité avec la distribution logarithmique.

TSUCHIYA (1963) a établi un lien avec l'étendue granulométrique (exprimée par $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$) et la position de l'origine. Il effectue son calcul de façon à ce que U_* ait la même valeur pour un calcul basé sur une loi logarithmique et pour un calcul à partir de la vitesse de surface et de la hauteur d'eau. Dans le cas d'une granulométrie uniforme, cela revient à considérer une origine à 0.25 d sous le sommet des particules.

CHENG & CLYDE (1972) enfin, considèrent à partir des équations de MANNING STRICKLER que l'origine doit être 0.15 d sous la crête des particules dans le cas de sphères.

Finalement MIZUYAMA retient que 25% de la surface du lit doit être au-dessus de l'origine. Cette valeur permet en effet d'améliorer grandement les résultats concernant le début de mouvement des particules (voir § 2.4.4.).

2.3.3. Rôle du nombre de Froude

L'influence du nombre de Froude sur la distribution de vitesse et sur les pertes de charge est probable mais difficile à exprimer. Cependant, la morphologie des lits torrentiels est telle que le nombre de Froude oscille généralement autour de l'unité.

IWAGAKI (1954) a étudié le coefficient a de l'équation (2-10). Il obtient deux expressions en fonction du nombre de Froude :

Fr < 0.89

$$a=10 \dots\dots\dots (2-23)$$

Fr > 0.89

$$a = 9.7 - 5.75 \ln(\text{Fr}) + 1.2 \times [\ln(\text{Fr})]^2 \dots\dots\dots (2-24)$$

Il apparaît donc que le nombre de Froude est un paramètre important des pertes de charge, en particulier lorsqu'il est au voisinage de l'unité. Cependant, MIZUYAMA a noté une forte dispersion entre ces formules et des expérimentations à forte pente avec des billes de verres de diamètre uniforme.

Cette formulation montre que f augmente avec le nombre de Froude.

D'autre part, MIRAJGAOKER & CHARLU (1971), à partir d'expérimentations sur des blocs naturels, ont montré que le coefficient de résistance augmente non seulement avec la rugosité relative mais aussi avec le nombre de Froude.

FLAMMER & al (1970) ont approché ce phénomène en considérant la traînée d'une demi sphère dans un écoulement de faible hauteur. L'évolution de la traînée en fonction du nombre de Froude et de la submersion relative est exposée à la figure ci-dessous :

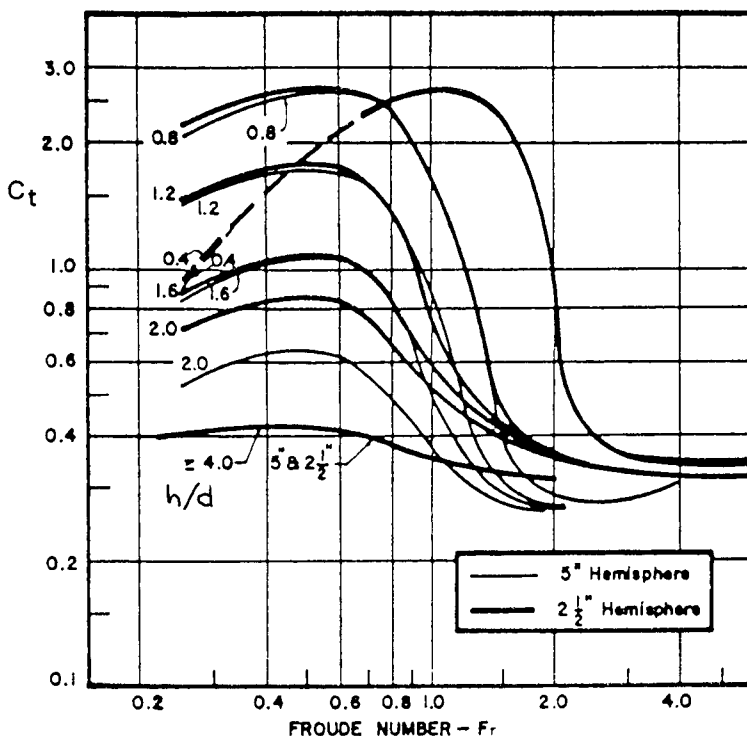


Figure 2-8 : effet du nombre de Froude sur le coefficient de traînée d'une demie sphère (d'après FLAMMER & al - 1970).

Ils ont pu ainsi mettre en évidence quatre zones :

- pour Fr entre 0.3 et 0.6, des vagues de plus en plus creusées se forment à la surface de l'eau entraînant une rapide augmentation du coefficient de traînée.
- Pour Fr entre 0.6 et 1.4 (nombre de Froude transcritique), des ressauts apparaissent en aval des obstacles. Cela correspond à une nette diminution du coefficient de traînée lorsque Froude augmente.
- Lorsque Froude passe de 1.4 à 2, le ressaut se déplace vers l'amont de l'obstacle et le coefficient de traînée termine sa diminution.
- Enfin, pour un écoulement très largement supercritique, le coefficient de traînée se stabilise à de faibles valeurs.

Si ces résultats sont intéressants, ils ne concernent qu'un élément isolé, ignorant les interactions complexes des sillages que l'on trouve en torrent et l'aspect tridimensionnel de l'écoulement. Cependant, ALTSHUL (1982) a réalisé un fond avec des éléments régulièrement espacés et a obtenu des résultats similaires.

CAO (1985) propose de prendre en compte l'influence du nombre de Froude lorsqu'il est compris entre 0.6 et 1.4 (domaine de ses essais) par l'intermédiaire des formules :

$$y = \alpha \left(\frac{R}{d_{50}}\right)^\beta Fr^\gamma \dots\dots\dots (2-25)$$

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = (1 - e^{-y}) \left(6.25 + 5.75 \ln\left(\frac{R}{d_{50}}\right)\right) \dots\dots\dots (2-26)$$

Les coefficients α , β , γ dépendent du matériau employé. Il trouve ainsi, au contraire des résultats de IWAGAKI (1954), que l'augmentation du nombre de Froude entraîne une réduction du coefficient f .

2.3.4. Synthèse

Dans un but d'éclaircissement, les conditions d'écoulement ont été considérées ici dans des conditions épurées : lit plat, granulométrie resserrée, absence de transport solide. Il apparaît cependant que l'écoulement dans un tel cas est extrêmement complexe à cause de la faiblesse de la submersion relative (h/d).

Ainsi, l'écoulement entre les particules ne peut plus être négligé ce qui entraîne un champ de vitesse vraiment tridimensionnel. D'autre part, une zone de sillage derrière chaque gros élément de rugosité, homogénéise les vitesses à proximité du lit et entraîne une stratification de l'écoulement en une zone très turbulente et homogène à proximité du lit et une distribution plus classique au-dessus.

Enfin, les alternances accélération - décélération avec oscillation autour du nombre de Froude critique ($Fr = 1$) achèvent de compliquer ce type d'approche.

Ainsi, malgré ses efforts, la communauté scientifique n'est pas encore parvenue à cerner de façon satisfaisante ce type d'écoulement. Le problème est d'ailleurs d'autant plus difficile que les paramètres pertinents ne sont pas encore définis. Ainsi, RICKENMANN (1992) considère que :

"Dans les torrents, il est pratiquement impossible de déterminer la profondeur beaucoup plus précisément que l'ordre de grandeur parce que l'on n'a pas de mesure précise et que la rugosité est très difficile à déterminer (et même à définir)."

Des formulations ont donc été établies en ne considérant plus la hauteur de l'écoulement mais le débit unitaire ($q = Q/B$). Par exemple, RICKENMANN propose la formulation suivante :

$$U = \frac{1.3q^{0.6} I^{0.2} g^{0.2}}{d_{90}^{0.4}} \dots\dots\dots (2-27)$$

Evidemment, une telle approche ne considère plus la distribution des vitesses, mais est destinée à des applications d'ingénierie.

2.4. Début de mouvement des particules

2.4.1. Définition du seuil de transport

Le concept de début de transport correspond à deux définitions distinctes :

- La première définition, intuitive, correspond au début de mouvement des particules lorsque les conditions hydrauliques deviennent plus vigoureuses. Dans ce cas, il est impossible de savoir si l'on est au niveau du début de mouvement car on ne peut que constater son dépassement à l'apparition de transport d'un grain. Ainsi les définitions varient grandement selon les auteurs.
- Une seconde définition, *a priori* plus robuste définit, le seuil de début de mouvement comme une variable de calage des formules de transport solide. Ainsi, le débit solide est calculé par rapport à la différence entre les conditions hydrauliques et des conditions critiques. On calcule ces conditions critiques de façon à obtenir un bon ajustement de la formule aux observations³.

Les deux approches ne convergent que dans la mesure où la formule de transport solide utilisée pour la définition du seuil de transport correspond parfaitement à la réalité physique des phénomènes.

Cependant, l'écart entre les deux définitions est généralement inférieur à celui lié au concept de seuil de début de mouvement. En effet, si la notion de début de transport correspond à une réalité pour un lit de granulométrie homogène et remaniée, il n'en est rien dans le cas d'un cours d'eau naturel, puisque l'on observe pour le même débit un transport solide nul dans certains cas, considérable dans d'autres.

D'autre part, il semble qu'il y a une différence entre le seuil de début de mouvement et celui d'arrêt des matériaux - LIN (1993). Cependant il est difficile de savoir si cette différence ne correspond pas plutôt à l'écart entre le seuil de transport d'un matériau sur le lit par rapport au seuil de transport d'un grain dans le lit. On comprend aisément que "l'arrachage" du grain demande des efforts nettement supérieurs à ceux nécessaires à sa mise en mouvement, et plus encore, à ceux suffisants à son maintien en mouvement.

Cette remarque montre combien le phénomène de début de mouvement est mal connu et que la confusion règne entre les différentes réalités regroupées sous ce terme. Cependant, dans le cas d'une granulométrie étendue, il n'est plus possible de confondre toutes ces notions.

Usuellement, les écarts observés sont attribués au phénomène de pavage.

Une approche dimensionnelle fait apparaître deux facteurs influents :

1. La contrainte de cisaillement adimensionnelle :
$$\tau_* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)d} = \frac{\rho R I}{(\rho_s - \rho)d}$$
2. le nombre de Reynolds du grain :
$$\mathcal{R}_e = \frac{\rho U d}{\mu}$$

³ C'est par exemple la démarche suivie par Shields. En général, on quantifie les conditions hydrauliques par le débit unitaire ou la contrainte de cisaillement.

Cependant, les paramètres suivants influencent aussi le seuil de transport :

- les conditions d'écoulement,
- la forte pente,
- la submersion relative,
- l'étendue granulométrique (cet aspect est traité au paragraphe 2-6),
- le pavage,

D'autres facteurs entrent probablement en jeu comme la forme des grains, mais leur influence est mal connue (PETIT 1989). En fait, ces notions sont encore très confuses et la distinction entre transport de matériaux en transit et dépavage du lit est rarement prise en compte. Pour les rivières où le transport de sable est continu, déplaçant les formes du lit même pour les faibles débits, cette nuance est négligeable.

Au contraire, dans le cas des torrents pavés[♯], seules les crues importantes peuvent remanier le pavage et l'écoulement ne transporte les petits éléments que lorsqu'ils lui sont directement fournis.

2.4.2. Approches classiques

SHIELDS (1936) à la suite d'essais en canaux sur une **granulométrie uniforme**, de faibles pentes et une submersion relative (h/d) importante a montré que pour un nombre de Reynolds du grain supérieur à 500, le début de transport des éléments se produisait lorsque τ_* dépassait 0,06. Suivant les auteurs, cette valeur varie entre 0,04 et 0,06.

Sa démarche s'est imposée et reste une référence dans le domaine du transport solide. La figure suivante correspond au diagramme de SHIELDS :

[♯] Ce signe signale les termes définis dans le glossaire.

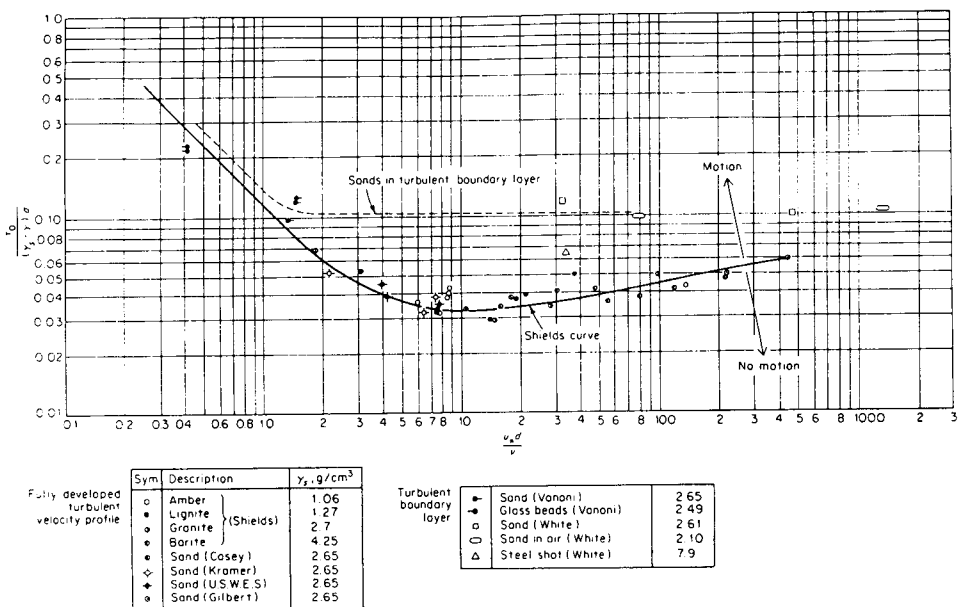


Figure 2-9 : Diagramme de SHIELDS : contrainte de cisaillement adimensionnelle en fonction du nombre de Reynolds du grain (d'après VANONI-1984)

Cependant SHIELDS lui même reconnaît les limites de son analyse (d'après GRAF 1989) et considère son expression valable

"Excepté dans le cas où la pente devient très appréciable. Dans ce cas RI n'est pas constant [pour le début de transport] mais augmente avec la pente et la diminution de la profondeur. L'explication de ce phénomène est liée au fait qu'avec la diminution de la profondeur la rugosité relative augmente. La déviation devient notable avec k_s/R supérieur à $1/25$."

Depuis, de nombreuses tentatives ont été réalisées pour mieux cerner le début de transport mais aucune n'a encore été vraiment fructueuse.

Un travail original concerne cette approche du seuil de début de mouvement : ANDREWS & SMITH (1992) considèrent le mouvement marginal des particules pour des contraintes de cisaillement adimensionnelles comprises entre 0.02 et la valeur de SHIELDS : 0.06. Ils estiment qu'il y a alors un transport solide occasionnel des particules les plus faciles à déloger. Ils parlent alors de transport solide marginal. Dans ce cas, le débit solide adimensionnel est inférieur à 10^{-3} .

L'importance de ce travail est montrée par les travaux d'ANDREWS (1984). Il a en effet montré à partir de l'analyse de 24 rivières à lit de graviers, que la contrainte de

cisaillement adimensionnelle dépasse 0.03 en moyenne 12 fois par an mais n'excède 0.07 que rarement (peut être une fois par siècle).

Utilisant une granulométrie uniforme ($d = 7.9 \text{ mm}$), ANDREWS & SMITH basent leur approche sur la distribution des angles au repos des particules.

Ils expriment alors la traînée et la portance sur une particule en fonction de la distribution des vitesses. En considérant une distribution Log-normale des angles au repos des particules, ils écrivent un modèle basé sur une analyse des forces dans le cas de charriage marginal. Celui ci correspond bien aux expériences qu'ils ont réalisées. Ils admettent que le départ des particules n'est possible que si l'angle au repos est dans une fourchette étroite autour de la valeur correspondant à la contrainte de cisaillement.

Un aspect intéressant de leur travail est de montrer que l'écart type de la distribution des angles de butée est un paramètre très important.

La principale lacune de leur travail est de ne pas tenir compte du masquage d'une particule par celles situées en amont. Cette lacune qui ne rend pas cette approche directement transposable au cas de granulométrie étendue, où l'angle de butée est une caractéristique secondaire du mouvement des petits grains par rapport à la distribution locale des vitesses. Ainsi, on observe souvent des petits grains vibrer dans le sillage de plus gros et y rester tant que l'écoulement ne varie pas.

Un autre aspect concerne la répartition de contrainte de cisaillement et de sa distribution spatiale. EINSTEIN comme MEYER-PETER & MULLER considèrent que la contrainte de cisaillement se décompose de la façon suivante :

$$\tau = \tau' + \tau'' + \tau''' \dots\dots\dots (2-28)$$

- τ' est la part de la contrainte exercée sur le matériau de base du lit et qui préside à sa stabilité. C'est la seule à considérer pour les rivières à faible pente et sinuosité réduite. C'est elle qui est responsable de la mise en mouvement des matériaux.
- τ'' est la part de la contrainte exercée sur les formes du lit comme, par exemple, les seuils ou les coudes. Elle est abordée au chapitre consacré à la morphologie,
- τ''' est la part de la contrainte exercée sur les grains en mouvement. Nulle sans débit solide, elle est considérable dans le cas d'écoulements hyperconcentrés. C'est elle qui explique les limites de capacité de transport. C'est pourquoi elle sera traitée au paragraphe du débit solide⁴.

Or seule la contrainte exercée sur le matériau du lit est responsable du début de mouvement. A partir de mesures de terrain, PETIT (1989) remarque que τ'' est souvent

⁴ En fait, cette décomposition n'est pas claire dans le cas d'un lit alluvial. Deux phénomènes se produisent lors du transport solide :

- Les grains transportés, parce qu'ils sont plus proéminents, ralentissent l'écoulement et leur transport consomme une part d'énergie significative. Isolés, ce phénomène entraîne une valeur de τ''' positive.
- Les caractéristiques du lit sont grandement modifiés par le transport solide. Il y a alors une redistribution globale des grains et le lit facilite l'écoulement (voir le chapitre 4). Seul, ce phénomène conduit donc à une valeur négative de τ''' .

Finalement, l'effet du transport solide sur l'écoulement dépend très largement de la restructuration du lit mais il semble qu'il agit généralement dans le sens d'une augmentation de la vitesse du fluide, au contraire des approches classiques.

du même ordre. La sous-estimation du seuil de transport est en partie causée par l'oubli de ces facteurs.

2.4.3. Influence de la pente

L'augmentation de la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique avec la pente est mise en évidence par la plupart des auteurs. Cependant, les explications de ce phénomène sont rares et compliquées par la faiblesse de la submersion relative qui y est souvent liée.

Il semblerait que l'augmentation de pente amplifie les contraintes inter granulaires, chaque élément s'appuyant sur le suivant lui empêchant ainsi tout mouvement alors que, lorsque la pente est nulle, les interactions des matériaux de la couche superficielle sont plus réduites.

BATHURST et AL. (1982) se basant sur les incontournables travaux de SHIELDS ont ajouté la notion de stabilité du lit par l'intermédiaire de l'angle au repos Φ et la pente du lit α . Ils considèrent la nouvelle contrainte adimensionnelle critique de cisaillement dépendant de la pente :

$$\tau_{*cs} = \frac{\tau_{c*}}{\tan \phi \cos \alpha - \sin \alpha} \dots \dots \dots (2-29)$$

MIZUYAMA propose plutôt l'expression suivante :

$$\tau_{*cs} = \frac{\tau_{c*}}{\tan \phi \cos \alpha - \left(\frac{s}{s-1}\right) \sin \alpha} \dots \dots \dots (2-30)$$

La figure suivante compare ces deux expressions pour $\tan \Phi = 1$ et la formulation 2-31 de MIZUYAMA.

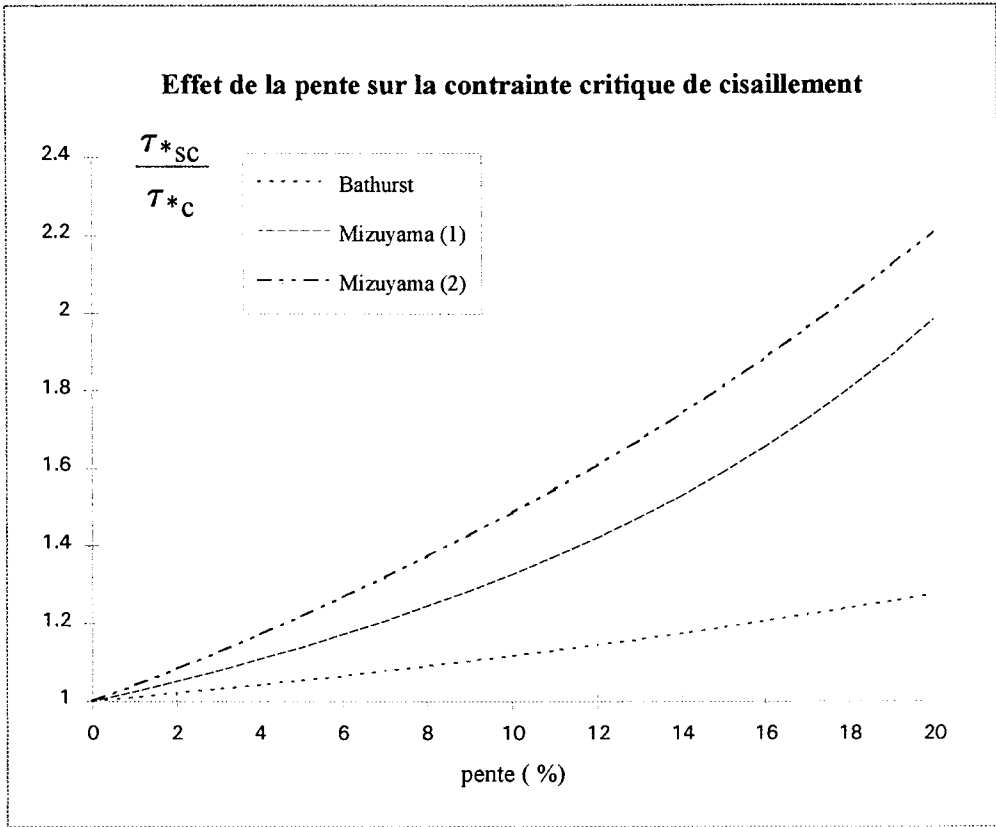


Figure 2-10 : comparaison des expressions (2-29) (2-30) et (2-31)

Ce graphique montre nettement que cette correction en fonction de la pente est loin d'être négligeable. A l'issue d'expérimentations, MIZUYAMA propose finalement :

$$\tau_{sc} = 0.04 e^{4I} \dots\dots\dots(2-31)$$

Cette fonction a été tracée à la figure 2-10 (sous le nom MIZUYAMA (2)). Il apparaît cependant que cette formulation accorde encore un plus grand rôle à la pente.

De même, GRAF & SUSZKA (1987) proposent la formule suivante à partir d'essais en canal :

$$\frac{\tau_{sc}}{\tau_c} = 10^{2.2I} = e^{5I} \dots\dots\dots(2-32)$$

Utilisant la notion de débit critique mieux adaptée aux irrégularités torrentielles, BATHURST et al. ont proposé à partir d'un matériau uniforme et des pentes comprises entre 0.25 et 25 % :

$$\frac{q_c}{\sqrt{gd^3}} = 0.15I^{-1.12} \dots\dots\dots(2-33)$$

Cette formulation est basée sur les travaux de MEYER PETER MULLER.

2.4.4. Rôle de la submersion relative

Comme l'avait remarqué SHIELDS, les effets de la submersion relative étant liés à ceux de la pente, il s'agit plus d'une autre approche de l'effet de la pente plutôt que la prise en considération d'un nouveau phénomène.

GRAF (1989) considère trois zones suivant la submersion relative :

- Lorsque $h/k_s > 25$, le calcul de la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique est réalisé en admettant un profil logarithmique de vitesse et en modifiant les constantes.
- Si $4 < h/k_s < 25$, Il s'agit d'une zone de transition : l'influence du nombre de Froude est notable.
- Avec $h/k_s < 4$, la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique dépend de la submersion relative. Cependant, les connaissances sont encore trop rudimentaires pour déterminer l'influence éventuelle du nombre de Froude.

Il propose, à partir d'essais, une relation statistique liant la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique aux paramètres de pente et de submersion relative :

$$\tau_{*c} = 0.61 \left(\frac{h}{k_s} \right) \dots \dots \dots (2-34)$$

Il s'agit plus de montrer qu'une faible submersion relative augmente la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique que de proposer une formule manifestement incorrecte en dehors de son domaine de calage.

SUSZKA (1987) avait proposé d'exprimer la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique uniquement en fonction de la submersion relative par :

$$\tau_{*cr} = 0.0851 \left(\frac{h}{d_{50}} \right) \dots \dots \dots (2-35)$$

ASHIDA et al. (1977) mettent en évidence un seuil de début d'influence de la submersion relative :

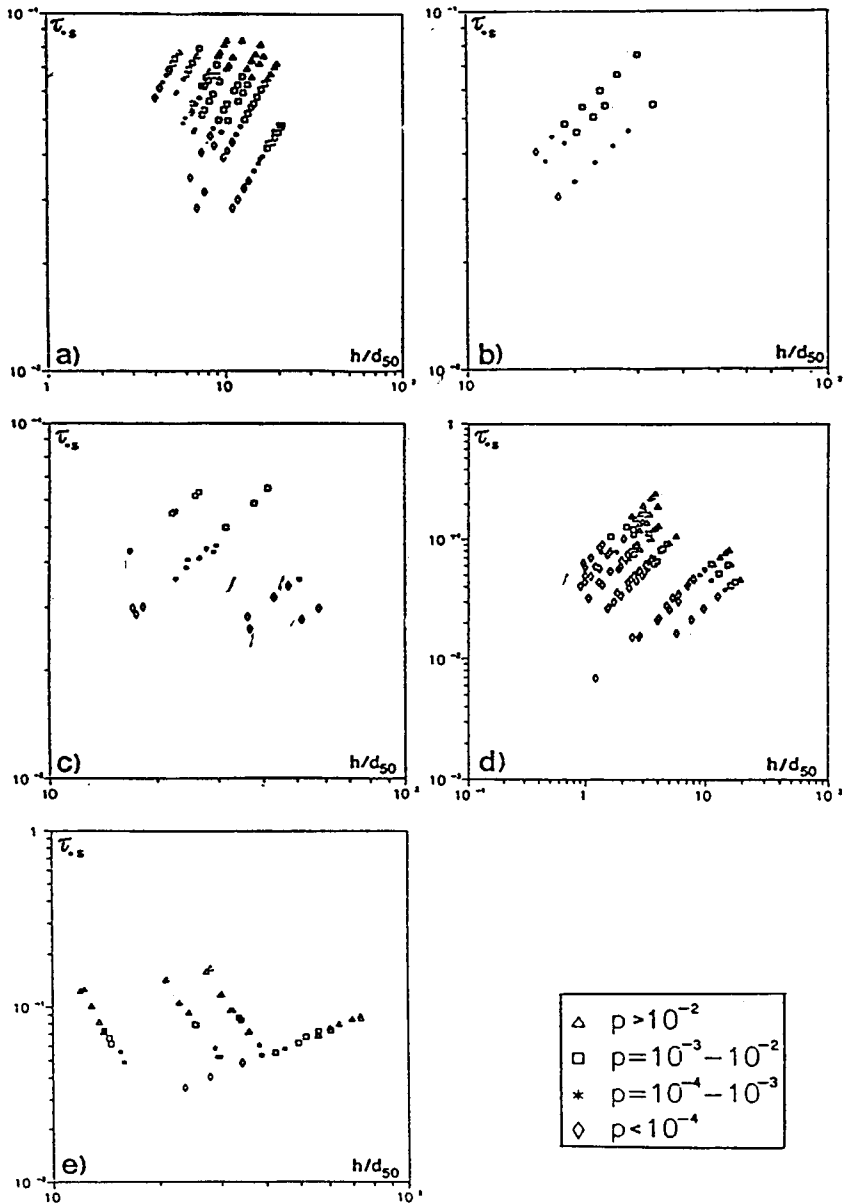
- si $h/d_{50} < 4.5$

$$\tau_{*sc} = \frac{\tau_{*c}}{\cos \alpha \cdot \tan \Phi - \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \right) \sin \alpha} = 0.034 e^{0.87 \frac{d_{50}}{h}} \dots \dots \dots (2-36)$$

- si $h/d_{50} > 4.5$

$$\tau_{*sc} = 0.04 \dots \dots \dots (2-37)$$

La figure suivante montre l'effet de la submersion relative sur le seuil de transport suivant les mesures de plusieurs auteurs.



Dimensionless shear stress, τ_s , vs. relative depth, h/d_{50} , with probability of sediment motion, p , as a parameter. Sources of data: a) Graf and Suszka, b) USWES, c) Ho Pang Yung, d) Cao, e) Meyer-Peter and Muller (see Tabl. 1).

Figure 2-11 : Contrainte de cisaillement adimensionnelle τ_s en fonction de la profondeur relative h/d_{50} et de la probabilité de mouvement du paramètre. (d'après GRAF et SUSZKA 1987)

2.4.5. Synthèse

Dès sa définition, le seuil de début de mouvement pose problème : En effet, il est défini soit comme l'état pour lequel le mouvement débute soit comme un paramètre de calage d'une formule de transport solide (SHIELDS - 1936 - a procédé de cette façon).

D'autre part, l'approche classique (considérant uniquement la contrainte de cisaillement) n'est plus valable lorsque la pente dépasse quelques pour-cents et lorsque la submersion relative devient faible.

Il est donc apparu que :

- **la pente**, lorsqu'elle augmente, accroît la contrainte de cisaillement critique. On observerait le doublement de la valeur critique pour une pente de 10 à 15 %.
- **La submersion relative**, en diminuant, augmente la contrainte de cisaillement critique de début de mouvement.

Cependant, il faut noter que ces paramètres évoluent de concert et qu'il est très difficile de distinguer l'influence propre à chacun.

D'autre part, il semble bien qu'il faille distinguer le seuil de début de déplacement des matériaux de celui de début d'arrachement des grains. D'autres phénomènes que les conditions hydrauliques moyennes interviennent alors comme la morphologie du lit ou l'effet d'une granulométrie étendue. Ces aspects seront traités par la suite.

2.5. Capacité maximale de transport

Le débit solide d'un cours d'eau correspond au volume ou au poids de matériaux passant par unité de temps en une section donnée. C'est donc une valeur locale et dépendante du temps. On distingue souvent les débits solides propres à chaque type de transport (charriage, suspension, laves torrentielles...).

Ici, seuls les phénomènes liés au charriage (hyperconcentré ou non) seront abordés. Les éléments déplacés ont trois origines :

- l'apport amont. C'est en général le plus important.
- le prélèvement dans le lit. Le pavage prend alors toute sa signification. Il convient de distinguer les matériaux appartenant à la structure du lit et ceux déposés sur le lit, qui sont en transit.
- les matériaux provenant des versants. Il s'agit d'un aspect particulier faisant intervenir des notions essentiellement géotechniques. De plus, de tels apports sont généralement localisés au pied des glissements de terrain et ne sont donc pas pris en compte ici⁵.

On considère généralement qu'une capacité de transport unique correspond à des conditions hydrauliques données. Ainsi, si le débit solide en amont d'un bief est inférieur à la capacité de transport, le cours d'eau érode, dans le cas contraire, il y a dépôt. Cette hypothèse correspond bien à la réalité dans le cas de rivières au lit non pavé.

Cependant, pour les torrents il n'y a pas d'échange entre les couches profondes du lit et l'écoulement, excepté pendant les crues assez fortes pour détruire le pavage⁶. Le débit solide est limité par deux phénomènes qui sont dans ce cas largement indépendants :

1. les conditions hydrauliques dont l'effet est assez bien rendu par les formules,
 2. la fourniture de sédiments par le lit qui échappe largement à une quantification.
- Lorsque cette limitation intervient, on parle de transport solide en déséquilibre (SUZUKI & KATO - 1989).

Ce double contrôle explique pour beaucoup les nombreuses déceptions rencontrées lors de l'application de formules au transport solide en torrent. Dans ce chapitre, seul le premier aspect lié aux conditions hydrauliques est abordé. Le second le sera d'une part au chapitre sur la granulométrie étendue, d'autre part à celui consacré au pavage.

Il ne s'agit pas ici de faire une nouvelle synthèse des nombreuses formules existantes mais uniquement de mettre en lumière les différents jeux de paramètres qui ont été utilisés pour expliquer le débit solide d'un cours d'eau.

⁵ On verra, dans le paragraphe 2.7.9 consacré au pavage, que l'on ne considère que le pavage lié directement au transport solide par le cours d'eau. Ainsi, les apports latéraux (éboulements, glissements de terrains, affluents, etc) ne sont pas pris en considération. Il y a bien, dans ce cas une augmentation de la résistance à l'écoulement, mais on ne peut plus vraiment parler d'un tri sélectif (dans la mesure où des éléments beaucoup trop gros sont totalement intransportables) et d'une structuration du lit par l'écoulement.

2.5.1. Approche classique

Le transport solide est, comme le début de mouvement, généralement expliqué par la contrainte de cisaillement adimensionnelle :

$$\tau_* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)d} = \frac{\rho R I}{(\rho_s - \rho)d} = \frac{\rho U^2}{g(\rho_s - \rho)d}$$

Le nombre de Reynolds du grain n'a pas d'influence tant qu'il dépasse 500. Cependant, surtout pour les fortes pentes, d'autres paramètres comme la pente ou le nombre de Froude peuvent intervenir.

MEYER-PETER & MULLER (1948) sont à l'origine de la formule de charriage la plus connue en France. Ce n'est pas la plus ancienne, mais c'est la première à avoir fourni des résultats satisfaisants et, malgré 40 ans de recherches, elle reste la formulation de référence.

Elle a été établie à partir d'une multitude de mesures en canaux dans les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} 0.04 < I < 2 & \quad \% \\ 0.4 < d < 30 & \quad \text{mm} \quad (\text{granulométrie uniforme}) \\ 2 < q < 4000 & \quad \text{m}^2/\text{s} \\ 1 < h < 120 & \quad \text{mm} \end{aligned}$$

La turbulence doit être complètement développée. Seul le transport par charriage est pris en considération. Cette formule s'exprime :

$$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gd^3}} = 8(\tau_*' - 0.047)^{3/2} \dots\dots\dots (2-38)$$

La difficulté est de déterminer τ_*' , la contrainte exercée uniquement sur les grains.

De multiples autres formules ont été développées prenant comme critère la différence entre la contrainte de cisaillement adimensionnelle et la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique.

Ainsi, TSUJIMOTO (1989) considère que la plupart des formulations sont de la forme :

$$q_{s*} = A\tau_{*c}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right)^m \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right)^n \dots\dots\dots (2-39)$$

avec	A	m	n	
	8	3/2	0	MEYER-PETER & MULLER
	4.25	1	0	BAGNOLD
	17	1	1	ASHIDA & MICHIEU
	5.7	3/2	0	LUQUE & BEEK

YANG (1989) lors d'études sur la morphologie fluviale a été conduit à définir un nouveau concept : la Puissance Unitaire d'Écoulement qui correspond à l'énergie potentielle par unité de poids d'eau et de temps consommé par l'écoulement. Il la

définit comme égale au produit de la vitesse moyenne de l'écoulement par la pente du lit (considérée comme égale à la pente de la ligne d'énergie).

Il a proposé de considérer la Puissance Unitaire d'Écoulement comme paramètre principal du transport solide au lieu de considérer la contrainte de cisaillement. Les bons résultats ainsi obtenus justifient que cette approche particulière soit abordée même si elle ne considère pas le domaine torrentiel.

Dans le cadre des rivières avec des sables naturels non cohésifs, il a montré que la P.U.E. était le meilleur paramètre pour une corrélation univoque avec la concentration en matériaux solide. Une telle utilisation est en effet séduisante car il est raisonnable de penser que la quantité d'énergie dissipée peut être convertie en transport solide.

Il montre que la puissance unitaire d'écoulement est un meilleur paramètre explicatif que la puissance totale du cours d'eau par unité de surface comme l'a défini BAGNOLD mais aussi que la contrainte de cisaillement. De plus, les résultats semblent indépendants du dessin du chenal. Cependant, YANG lui même reconnaît que cette approche concerne un écoulement monodimensionnel sur un lit sans pavage.

Pour des lits de sable et à partir de 1225 données de laboratoire et 50 de terrain, il obtient l'équation suivante en utilisant une équation adimensionnelle et en se basant sur les équations de la mécanique des fluides et en intégrant la distribution verticale de concentration de sédiments de ROUSE. Il obtient :

$$\ln(C_t) = 5.44 - 0.29 \ln \frac{wd}{v} - 0.46 \ln \frac{U_*}{w} + (1.8 - 0.41 \ln \frac{wd}{v} - 0.31 \ln \frac{U_*}{w}) \times \ln \left(\frac{U - U_c}{w} \right) \quad (2-40)$$

avec

- U_c vitesse critique de début de mouvement
- C_t concentration totale en sédiments (charriage plus suspension)
- w vitesse de chute du sédiment
- v viscosité cinématique

Les valeurs critiques sont obtenues d'une manière similaire :

$$\text{pour } 1.2 < \frac{U_* d}{v} < 70 : \quad \frac{U_c}{w} = \frac{2.5}{\lambda v \left(\frac{U_* d}{v} \right) - 0.06} + 0.66 \quad (2-41 \text{ a})$$

$$\text{et pour } 70 \leq \frac{U_* d}{v} : \quad \frac{U_c}{w} = 2.05 \quad (2-41 \text{ b})$$

Les résultats obtenus sont d'une précision impressionnante surtout par rapport aux autres formules de débit solide.

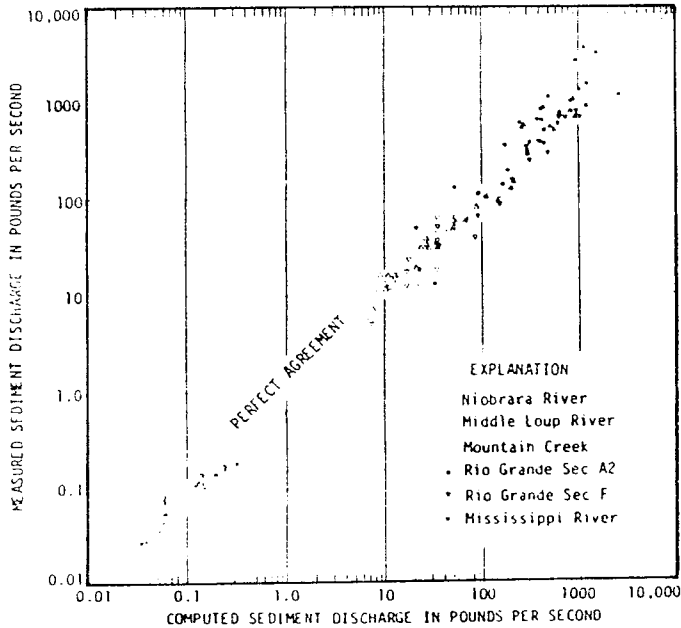


Figure 2-12 : Comparaison entre les valeurs calculées et les mesures de débit solide sur 4 rivières (d'après YANG 1989).

Ensuite, YANG a étendu son équation aux lits de graviers, en utilisant la même théorie mais en modifiant les coefficients numériques. Il obtient

$$\ln(C_t) = 6.68 - 0.63 \ln \frac{wd}{v} - 4.82 \ln \frac{U_*}{w} + (2.78 - 0.31 \ln \frac{wd}{v} - 0.28 \ln \frac{U_*}{w}) \times \ln \left(\frac{UI - U_{cI}}{w} \right) \quad (2-42)$$

Par contre, il propose de conserver les équations déterminant les conditions de début de mouvement qu'il avait établies pour du sable. Les résultats obtenus sont bons mais l'erreur est beaucoup plus importante et YANG considère que la validité de cette équation est réduite aux données utilisées dans son article.

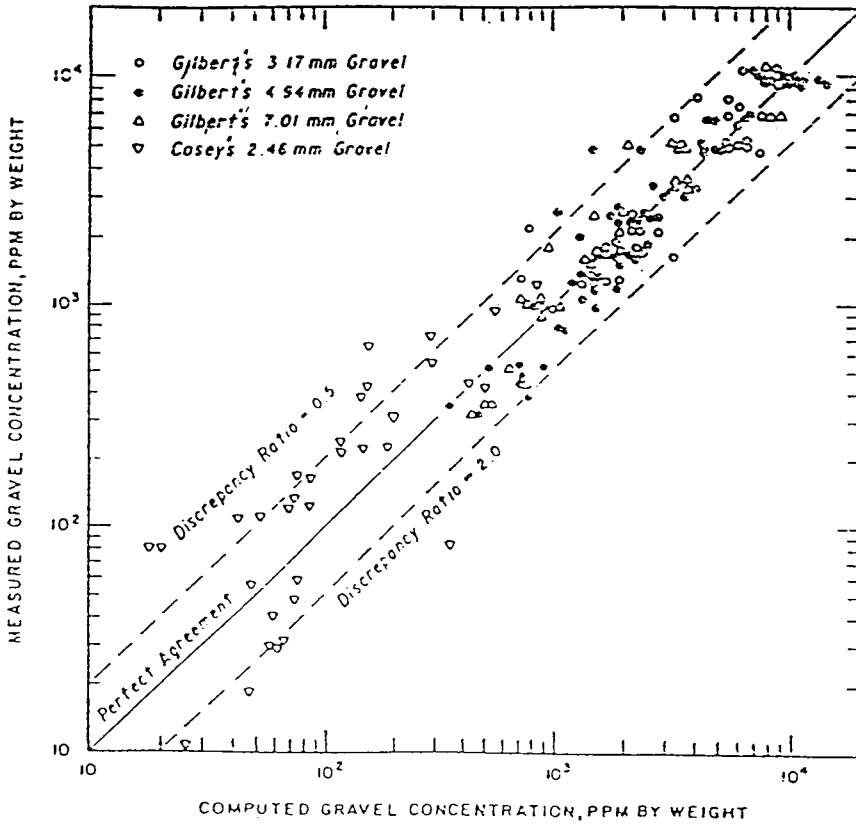


Figure 2-13 : Comparaison entre les mesures de débit solide en canal et les valeurs calculées (d'après YANG 1989).

Les formulations précédentes, pertinentes pour les rivières, ne peuvent être extrapolées au domaine torrentiel car elles ne prennent pas en compte certains aspects caractéristiques de ces cours d'eau :

- la forte pente,
- les concentrations très élevées et leurs interactions sur l'écoulement,
- les valeurs considérables du transport en suspension,
- la submersion relative,
- l'effet transitoire,
- les variations spatio-temporelles et leur interaction avec la morphologie. Ce dernier point sera abordé au dernier chapitre consacré à la morphologie.

2.5.2. Particularité des Fortes pentes

L'approche la plus systématique est celle de SMART & JAEGGI (1983). Ils ont réalisé des tests dans un chenal de faible largeur (0.2 m), mais à forte pente, le débit solide étant déterminé pour obtenir l'équilibre du lit. Celui ci semblait très instable et une faible variation du transport solide entraînait une brusque évolution du bief. Ces expériences ont permis de faire les observations suivantes :

- Les débits solides injectés étaient trop importants pour permettre l'étude les phénomènes liés au tri granulométrique et aux formes du lit (seules des antidunes peu développées sont apparues dont l'effet sur la rugosité était faible). De plus, les formes du lit disparaissent lorsque le débit solide s'accroît.
- Pour les faibles pentes, les phénomènes sont ceux qui correspondent au charriage "classique" : glissement, roulement ou saltation des sédiments. L'épaisseur de la couche de transport était de l'ordre du d_{90} pour les éléments grossiers et de deux à trois diamètres pour des grains plus fins. Elle apparaît ainsi essentiellement dépendante du débit solide.
- Pour des lits plus raides, le débit solide prend des valeurs très élevées alors que la submersion relative diminue. Le mouvement des grains ressemble à un processus de suspension, certains étant éjectés de l'écoulement alors que les couches inférieures empêchent le contact avec le lit des éléments proches de la surface.
- Enfin, pour des pentes supérieures à 20% se produit une fluidisation du lit et de pseudo laves torrentielles. Ces écoulements n'ont pas été abordés lors de cette étude.
- Les écarts obtenus entre les mesures et les calculs par la formule de MEYER-PETER & MULLER sont expliqués par l'évolution de la rugosité de peau, la formule $K = 26 \cdot d_{90}^{-1/6}$ n'étant plus valable pour les fortes pentes.

Une nouvelle équation de transport solide calée sur les données de MEYER-PETER & MULLER et celle obtenues sur ce canal à forte pente est proposée en se basant sur les remarques suivantes :

- le paramètre de SHIELDS est modifié pour tenir compte de l'effet de la pente sur l'équilibre du grain :

$$\tau_{*sc} = \tau_{*c} \left(\cos(\alpha) \times \left(1 - \frac{1}{\tan \Phi} \right) \right) \dots \dots \dots (2-43)$$

- la hauteur totale du mélange (en tenant compte de la présence des sédiments dans la section) est considérée pour le calcul de la contrainte de cisaillement au lieu de la hauteur d'eau fictive : $h_w = q/U_w$, la différence peut atteindre 80%.
- les résultats sont meilleurs avec $(\tau - \tau_c)\tau^n$ qu'avec $(\tau - \tau_c)^n$ (n et n' sont des coefficients destinés à indiquer la forme de la relation),
- l'effet de l'étendue granulométrique est pris en compte par le rapport d_{90}/d_{30} ,

Finalement, l'équation suivante est proposée :

$$q_s = \frac{4}{s-1} \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} q I^{1.6} \left(1 - \frac{\tau_{*c}(s-1)d_m}{h_m I} \right) \quad R^2 = 0.97 \dots \dots \dots (2-44)$$

La figure suivante délimite la zone d'application de la formule au moyen des nombres adimensionnel τ/τ_c & R/d_m . La spécificité du transport solide apparaît nettement : des conditions hydrauliques très au-dessus du seuil de début de transport, et une submersion relative proche de l'unité. De ce point de view, les travaux de SMART & JAEGGI correspondant à de très fortes crues, la submersion relative est nettement supérieure à celle des petites crues qui façonnent les lits torrentiels.

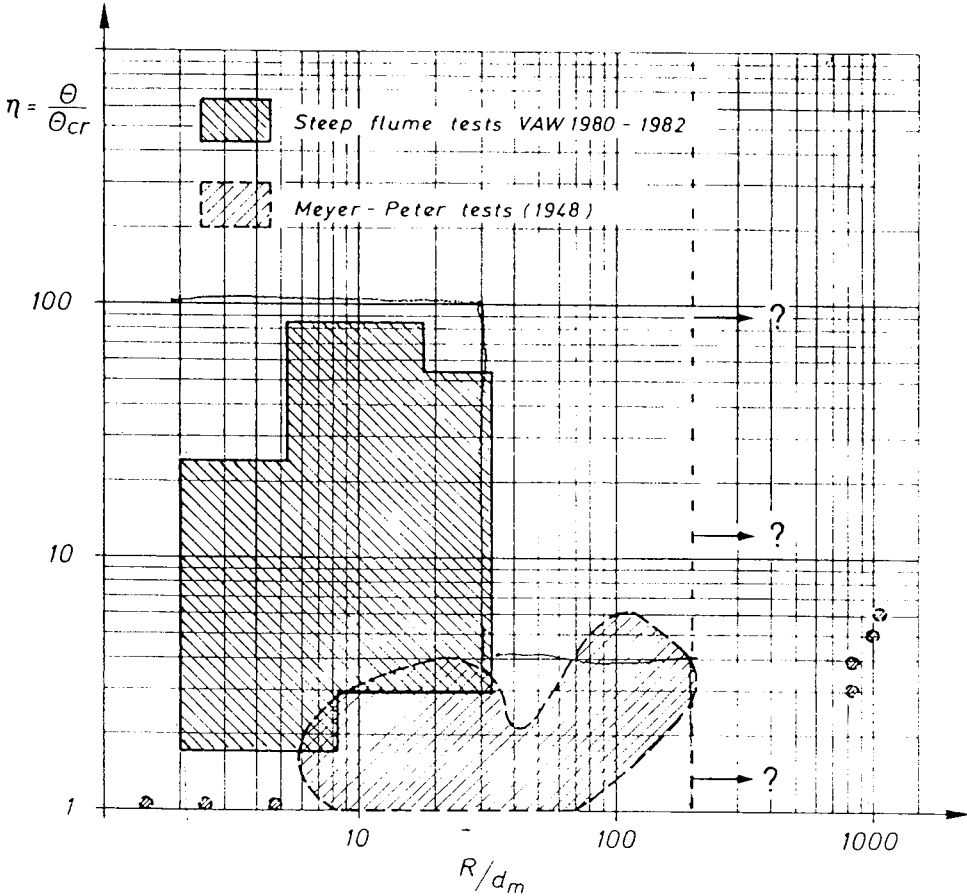


Figure 2-14 : Situation des paramètres τ/τ_c & R/d_m lors des essais ayant permis le développement des formules (d'après SMART & JAEGGI - 1983)

Enfin, à l'issue d'une étude sur la rugosité, une procédure de calcul itératif du transport solide et de la hauteur du mélange est proposée afin de coupler les phénomènes de charriage hyperconcentré et de rugosité. Il est en effet apparu que le transport solide avait un effet important sur les conditions hydrauliques.

La détermination de la vitesse moyenne des sédiments montre, malgré son imprécision, les tendances suivantes : elle augmente avec la pente et le débit liquide mais décroît à nouveau pour les pentes très fortes à cause de l'augmentation des pertes de charge dues au transport solide.

Ces formulations peuvent évidemment être simplifiées lorsque l'on s'éloigne du seuil de début de mouvement. Ainsi, RICKENMANN (1990) propose deux formules :

- pour $0.2 < I < 20 \%$:

$$q_{s*} = 3.1 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \tau_*^{0.5} (\tau_* - \tau_{*c})^{0.5} Fr^{1.1} (s-1)^{-0.5} \dots\dots\dots (2-45 a)$$

- pour $5 < I < 20 \%$ & $0.1 < \tau_* < 3$:

$$q_{s*} = 8 \tau_*^2 \dots\dots\dots (2-45 b)$$

La formule (2-45 a) est une modification de la formule de SMART & JAEGGI (1983). TAKAHASHI (1987) l'a comparée aux principales formules japonaises, et toutes donnent des résultats similaires.

La formule (2-45 b) correspond tout à fait au charriage hyperconcentré (*immature debris flow*). Par une approche théorique, RICKENMANN (1990) a montré qu'on a alors q_{s*} proportionnel à $\tau_*^{2.5}$.

Il semble cependant préférable dans un tel cas d'utiliser la concentration en matériau plutôt que des valeurs adimensionnalisées par un diamètre représentatif du matériau. Il semble en effet que, loin du seuil de début d'entraînement, la taille des matériaux soit secondaire. Ainsi, MEUNIER (1989) a proposé pour le charriage hyperconcentré :

$$C = \frac{Q_s}{Q} = 6.3 I^2 \dots\dots\dots (2-46)$$

Là encore, il y a une bonne adéquation avec les résultats obtenus en canal.

Il est bien évidemment possible d'utiliser d'autres variables que la contrainte de cisaillement adimensionnelle, pour mieux s'adapter aux conditions rencontrées en torrent. Ainsi, BATHURST & al. (1985) proposent :

$$q_s = \frac{2.5}{s} I^{3/2} (q - q_c) \dots\dots\dots (2-47)$$

Cependant, toutes ces formules (surtout avec la contrainte de cisaillement) nécessitent l'emploi de formules de pertes de charge ce qui constitue une difficulté réelle pour un écoulement hyperconcentré.

Au contraire, la formule de LEFORT (1991) considère qu'il y a interaction entre transport solide et caractéristiques géométriques du lit. Le débit solide dépend alors uniquement du débit liquide total ce qui permet d'éviter des interrogations sur les caractéristiques géométriques du lit en crue. Seules les formules sommaires (loin du seuil de début de mouvement) permettent d'ignorer la largeur de l'écoulement. Elle s'exprime par :

$$\frac{Q_s}{Q} = 4.45 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \frac{\rho}{\rho_s - \rho} I^{1.5} \left(1 - \left(\frac{Q_{lc}}{Q} \right)^{0.375} \right) \dots\dots\dots (2-48)$$

avec

$$\frac{Q_{lc}}{\sqrt{g d_m^3}} = 0.295 \times I^{-13/6} (1 - 1.2 I)^{8/3} \dots\dots\dots (2-49)$$

Cette formulation de début de mouvement correspond à $\tau_{*c} = A \cos \alpha (1 - \tan \alpha / \tan \Phi)$.

Avec A correspondant à la valeur critique de MEYER-PETER (0.047) ou celle de SHIELDS (0.06).

Ajustée sur 300 valeurs, correspondant à des conditions très différentes, elle fournit une valeur comprise entre la moitié et le double des valeurs observées (pour 90% des points) ce qui est remarquable étant donnée la facilité d'emploi d'une telle formulation et la grande variabilité des phénomènes.

RICKENMANN (1989, 1990) a étudié l'effet d'une forte concentration d'argile sur le charriage d'éléments grossiers. Il distingue les fluides qui ont un comportement de Bingham et pour lesquels le transport solide comme la turbulence sont fortement diminués et les fluides newtoniens où la résistance à l'écoulement n'est pratiquement pas modifiée. Dans ce cas et avec des pentes comprises entre 7 et 20 %, il tire les conclusions suivantes :

- le seuil de début de mouvement est diminué,
- le transport solide augmente nettement avec la concentration en argile (voir figure suivante) tant que l'épaisseur de la sous couche laminaire est inférieure au diamètre moyen des éléments du lit,
- la responsabilité de ces changements incombe à la variation de densité du fluide.

Il reprend alors l'équation de SMART & JAEGGI (1983) mais en reconsidérant l'exposant du terme de densité relative (s-1). La puissance initiale -1 dérivait uniquement d'une analyse dimensionnelle car des essais avaient été effectués avec une densité relative constante. D'où finalement :

$$q_s = 12.6 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} (q - q_{cr}) I^2 (s-1)^{-1.6} \quad R^2 = 0.95 \dots\dots\dots (2-50) :$$

avec

$$q_{cr} = 0.065 (s-1)^{1.67} \sqrt{g} d_{50}^{1.5} I^{-1.12} \dots\dots\dots (2-51)$$

La valeur de l'exposant (-1.6) est confirmée par les recherches de BATHURST & al (1985).

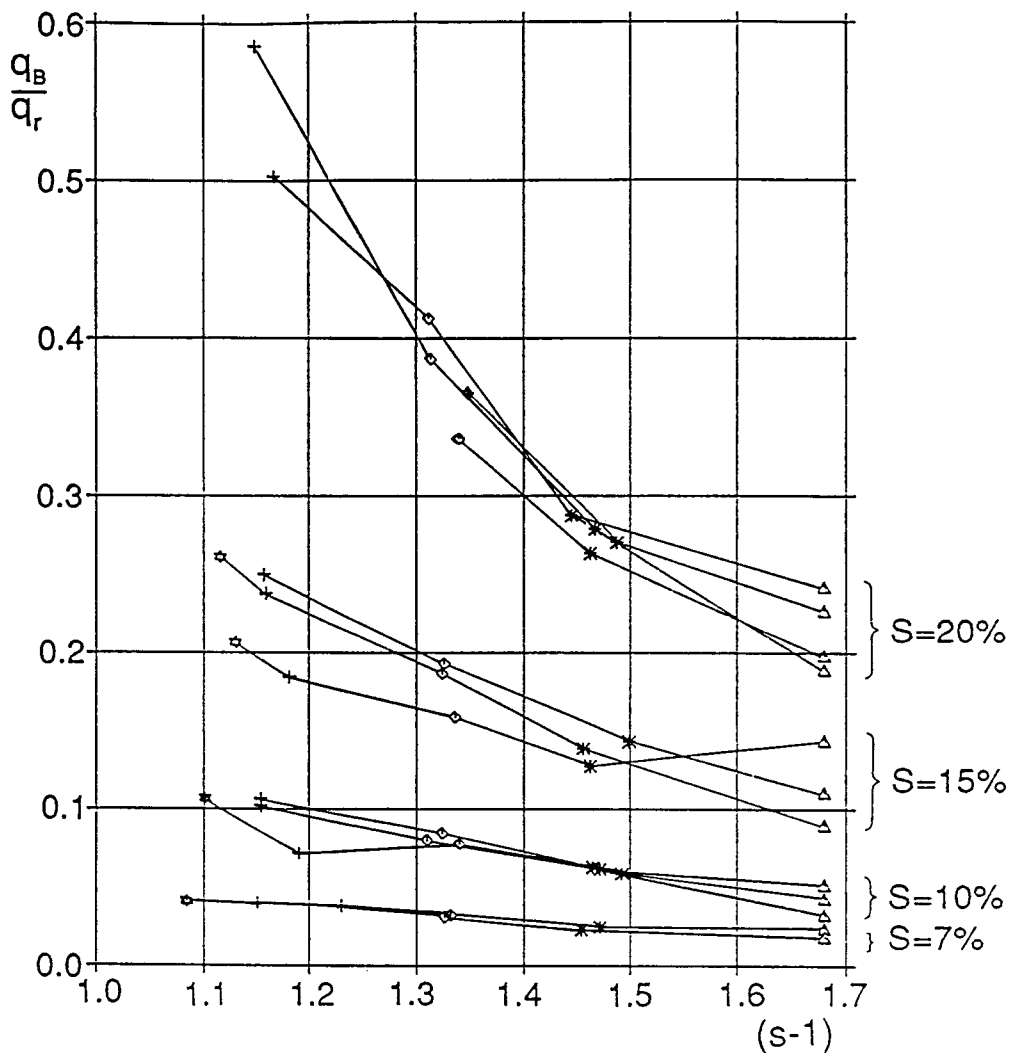


Figure 2-15 : rapport du débit unitaire de charriage sur le débit liquide unitaire en fonction de la densité du fluide (d'après RICKENMANN 1989).

De même, LOW (1989) a réalisé des expériences avec de faibles pentes et en faisant varier la densité des sédiments transportés par charriage. Il trouve un débit solide proportionnel à $(s-1)^{-1.5}$ ce qui est très proche de ces résultats.

RICKENMANN propose une expression plus générale, liant le débit solide adimensionnel à la contrainte de cisaillement et au nombre de Froude :

$$Q_{s*} = 3.1 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \tau_*^{0.5} (\tau_* - \tau_{*c}) Fr^{1.1} (s-1)^{-0.5} \dots\dots\dots (2-52)$$

Un autre aspect important concernant les torrents est l'aspect transitoire des écoulements. En effet, les crues sont d'autant plus rapides que le lit est pentu et que le bassin versant est petit. De plus, les débâcles sont une des caractéristiques des crues torrentielles.

La vitesse des variations de débit liquide est souvent considérée comme ayant un effet sur le transport solide. Cependant, l'imprécision des formules actuelles, la difficulté de mesure, le nombre important de paramètres à prendre en compte expliquent que cet aspect ait été peu étudié.

GRAF & SUSZKA (1985) ont abordé ce problème dans un canal avec une pente de 1 à 1.5 % et une granulométrie uniforme. La faiblesse de la pente limite cependant la portée d'une telle approche pour les torrents, mais elle reste très pertinente pour les rivières torrentielles.

Dans une première série d'expériences, ils ont mesuré la relation entre la pente et la hauteur de l'écoulement d'une part et le débit solide d'autre part, en régime permanent. Ensuite, ils ont ajouté un hydrogramme triangulaire à un écoulement permanent défini par sa vitesse de frottement U_* . La figure suivante illustre la différence entre la partie montante et la partie descendante de l'hydrogramme.

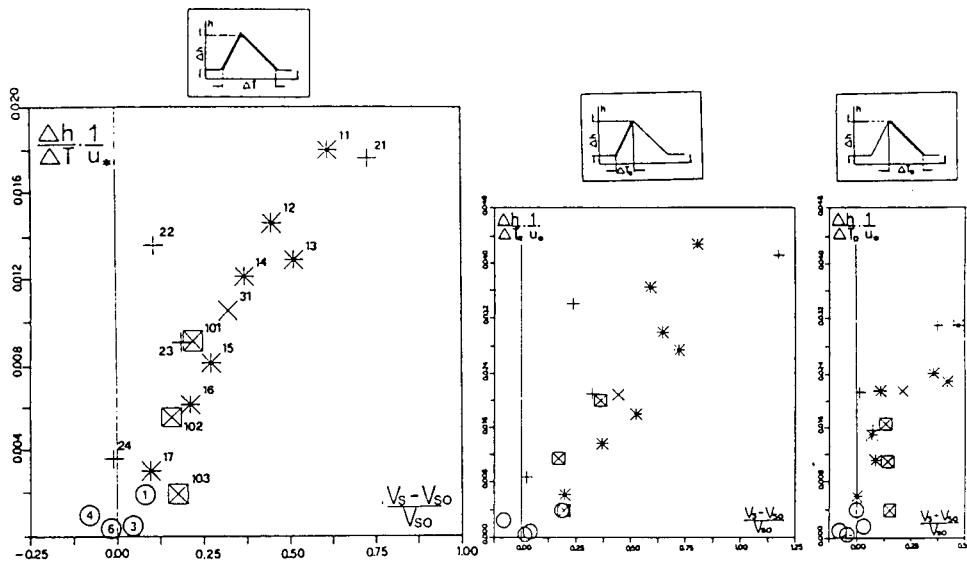


Figure 2-16 : Modélisation d'hydrogramme (d'après GRAF & SUSZKA 1985).

Ils ont ensuite recherché une relation de la forme :

$$\frac{V_s - V_{s0}}{V_{s0}} = f\left(\frac{\Delta h}{\Delta T U_*}\right) \dots\dots\dots (2-53)$$

avec

V_s est le volume solide mesuré

V_{s0} est le volume solide calculé à partir des mesures en régime stationnaire

Δh variation de hauteur de l'écoulement

ΔT durée considérée (partie montante, partie descendante ou ensemble de l'hydrogramme)

Les mesures réalisées sont tracées à la figure 2-16. Si les auteurs refusent d'en tirer une relation, ils proposent les conclusions suivantes :

- les deux termes de l'équation varient dans le même sens,
- pour une pente du fond fixée, les hydrogrammes les plus raides entraînent les volumes les plus grands,
- ces remarques restent valables pour les parties montantes et descendantes,
- l'essentiel de l'écart est produit par la partie montante.

Ces résultats sont intéressants et leur application au Rhône suisse explique une augmentation de 25% du transport solide.

2.5.3. Influence sur les conditions d'écoulement

Le transport solide intervient à deux niveaux sur les pertes de charge :

- la création de formes dans le lit (dunes, rides, etc..) dont l'effet sur l'écoulement modifie la rugosité. Cet aspect sera considéré au chapitre consacré à la morphologie.
- le transport de matériaux proprement dit qui consomme une énergie susceptible de devenir importante.

LARSEN (1990) a étudié en modèle réduit le charriage hyperconcentré dans des conduites de chasse de prise d'eau : il s'agit donc d'un écoulement en charge. Pourtant les remarques qu'il fait sur la couche de transport semblent encore pertinentes pour un écoulement à surface libre.

En considérant un profil logarithmique, il montre que la rugosité équivalente est égale au sixième de l'épaisseur de la couche de transport. Cette épaisseur étant proportionnelle au débit solide il apparaît que les pertes de charge sont proportionnelles au débit solide, au moins dans le cas d'écoulements hyperconcentrés. Il a mesuré que les pertes de charges ne sont pas dépendantes de la taille du grain mais seulement de la concentration en matériaux transportés.

D'autre part, il a repris les notions de BAGNOLD (1955) sur la décomposition de la contrainte inter granulaire en une composante normale au fond et une composante tangentielle reliées par l'angle de friction dynamique Φ' :

$$\tau = \tau_f + \tau_s = \tau_f + \sigma_s \tan \Phi' \dots\dots\dots (2-54)$$

L'indice s correspond au sédiment et l'indice f au fluide.

Or, SHOOK & al (1982) ont mesuré la concentration en matériaux et montré qu'elle décroît linéairement avec la hauteur. Cela correspond bien avec l'observation de LARSEN qui constate que l'épaisseur de la couche de transport est divisée de moitié lorsque l'écoulement est brusquement arrêté. En considérant que la couche immobile la plus haute est compactée par le transport solide et approche la valeur maximum du matériau, il est alors possible de calculer la distribution des contraintes. Au niveau du fond, LARSEN obtient :

$$\tau = \frac{1}{2} g (\rho_s - \rho) C_d \delta_s \tan \Phi' \dots\dots\dots (2-55)$$

avec

- C_d concentration volumique des matériaux du fond
- δ_s épaisseur de la couche mobile de sédiments

Lors de ces tests, l'épaisseur de la couche de transport a été trouvée indépendante de la taille des grains et proportionnelle à la racine carrée du débit solide unitaire. Une telle approche permet d'obtenir une relation de débit solide très comparable avec celle de PETER-MEYER & MULLER comme le montre la figure suivante :

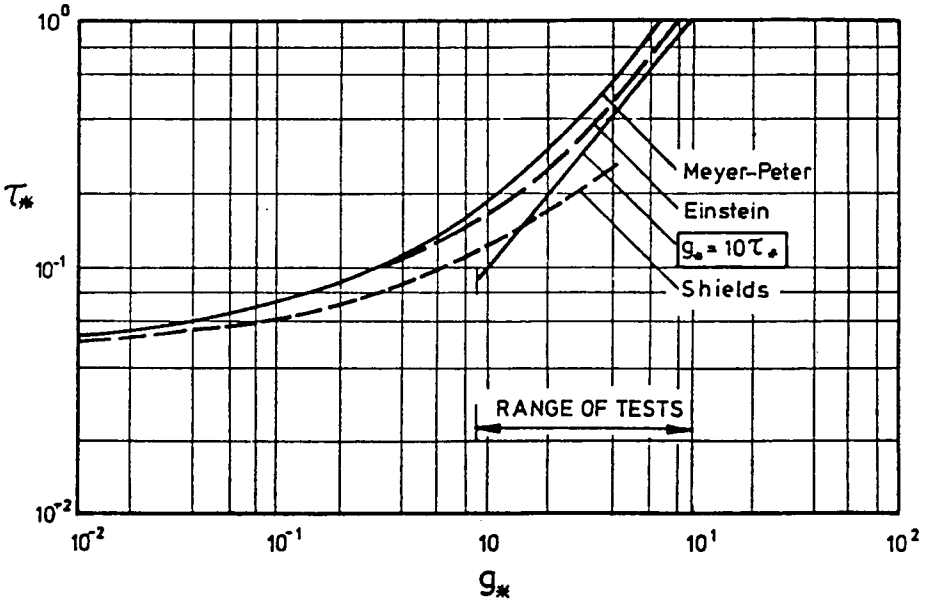


Figure 2-17 : contrainte de cisaillement adimensionnelle en fonction du débit solide adimensionnel - comparaison de différentes formules (d'après LARSEN 1990).

Ce travail est intéressant car il montre que pour une contrainte de cisaillement élevée, l'approche par la contrainte de cisaillement adimensionnelle est très pertinente. Il faut cependant noter que, dans un tel conduit, l'écoulement dispose de très peu de liberté et que les phénomènes restent très artificiels.

Il apparaît donc que le transport solide a un rôle conséquent dans les pertes de charge. SMART ET JAEGGI (1983) ont intégré l'importance de la couche de transport dans le calcul de la perte de charge⁶. Ils obtiennent finalement le jeu de formules suivantes :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2.5(1 - \exp(0.05 \frac{h_m}{d_{90}}))^{0.5} \ln(\frac{8.2h_m}{d_{90}}) \dots\dots\dots (2-56)$$

avec

$$\frac{h_w}{h_m} = 1 - 1.41 I^{1.14} q_{s*}^{0.18} \dots\dots\dots (2-57)$$

h_w hauteur d'eau
 h_m hauteur totale du mélange

2.5.4. Synthèse

Finalement, le transport solide, lorsqu'il ne dépend que des conditions hydrauliques est d'une approche relativement simple. La formule de MEYER-PETER ET MULLER (1947) pour les faibles pentes et celle de SMART & JAEGGI (1983) ou l'une de ses dérivées pour les fortes pentes donnent une bonne approximation de la capacité maximale de transport solide par charriage.

D'autre part, des expressions très simples peuvent être démontrées dans le cas de conditions hydrauliques beaucoup plus vigoureuses que celles correspondant au seuil de début de transport. Il apparaît alors que seule la concentration en matériaux et la pente interviennent - indépendamment de la granulométrie.

Ainsi, malgré des formulations nombreuses et très différentes, les comparaisons réalisées par TAKAHASHI entre les formules montrent qu'elles sont toutes assez proches. Or il apparaît un écart très important lors de la confrontation à des cas réels⁷, les formules conduisant généralement à une surestimation très nette du transport solide.

Cet écart est usuellement attribué au pavage. Plus précisément, il semble que deux phénomènes expliquent cette résistance du lit à l'érosion : le tri et l'imbrication des matériaux de granulométrie étendue et la morphologie du lit. Ces deux points sont développés ci dessous.

⁶ Cette démarche est intéressante car elle montre la particularité du charriage hyperconcentré : le débit solide ne peut être négligé lors de la détermination des conditions hydrauliques.
⁷ On ne considère ici que le cas d'un torrent s'écoulant librement dans ses alluvions. Il est bien évidemment que des conditions particulières (torrent canalisé, goulotte en béton ou pavage d'origine externe - éboulis), ne peuvent que conduire à des particularités du débit solide.

2.6. Effet de la granulométrie étendue sur les phénomènes torrentiels - tri granulométrique

2.6.1. Approches

Dans les rivières, les éléments sont généralement transportés et triés sur de longues distances et classiquement la pente diminue de l'amont vers l'aval limitant ainsi la taille des éléments transportés. Ainsi, toutes les conditions sont réunies pour qu'un tri granulométrique efficace limite l'étendue de la taille des matériaux. Dans bien des cas, l'écart entre une granulométrie uniforme et la granulométrie réelle du lit est secondaire. Le torrent, au contraire, reçoit directement des versants des éléments de taille très variable et ne dispose ni de la place ni de la longueur nécessaire pour effectuer un tri granulométrique suffisant. D'autre part, la forte pente permet le transport de très gros éléments. Il n'est alors plus acceptable de faire l'hypothèse d'une granulométrie uniforme. Or, un lit mobile composé d'une granulométrie étendue est d'une approche extrêmement complexe.

En effet, prise individuellement, chaque particule se comporte essentiellement en fonction de son diamètre. En particulier, le seuil de début de transport est proportionnel à la taille de la particule : lorsque les éléments transportés en charriage représentent une étendue granulométrique de 1 à 100, cela signifie que des contraintes de cisaillement 100 fois plus élevées sont nécessaires pour les matériaux grossiers.

Or, toutes les tailles sont représentées dans un lit mais en proportions différentes.

Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte la distribution globale des diamètres dans le cas d'un mélange de grains de tailles différentes, chaque classe granulométrique n'agissant que par rapport aux autres. Cependant, les études réalisées dans ce domaine sont généralement conduites en adaptant les connaissances acquises en granulométrie uniforme et en les généralisant au moyen de coefficients adimensionnels basés sur des diamètres caractéristiques du mélange.

2.6.2. Début de mouvement des particules

L'effet de l'étendue granulométrique sur la mobilité des éléments est considérable. Le processus de dissimulation des grains de faible taille entre les matériaux plus grossiers et la surexposition des blocs les plus importants réduisent l'écart de mobilité des matériaux. La quantification de cette influence est capitale pour l'explication et la détermination de la structuration et la granulométrie d'un lit.

L'approche classique de ce phénomène consiste à corriger le paramètre de SHIELDS de chaque classe granulométrique avec un coefficient multiplicatif h_i . Ce coefficient, censé correspondre à cette surexposition/dissimulation est appelé **coefficient de masquage**. On a alors :

$$\tau_{e_i} = h_i \tau_{e_{i0}} \dots \dots \dots (2-58)$$

h_i coefficient de masquage. Assez souvent, il est exprimé sous la forme :

$$h_i = \left(\frac{d_a}{d_i}\right)^n \dots\dots\dots (2-59)$$

avec d_a diamètre des grains non affectés par cet effet de masquage. Cependant, des formulations très différentes peuvent être proposées, comme celle d'EGIAZAROFF ou de DISPLAS décrites ci dessous.

d_a est généralement un peu supérieur au d_{50} et assez proche de d_m , en accord avec MIZUYAMA (1977) qui considère que l'étendue granulométrique réduit la mobilité des éléments de diamètre médian. En fait, il est probable que d_a dépende de la distribution granulométrique mais aussi des conditions hydrauliques.

ANDREWS (1983) a établi pour une couche pavée et $0.3 < d_i / d_{50} < 4.2$:

$$\tau_{ci} = 0.0834 \left(\frac{d_i}{d_{50}}\right)^{-0.872} \dots\dots\dots (2-60)$$

PARKER & al. (1982) utilisent la même formulation mais avec l'exposant -0.982 se rapprochant ainsi de la mobilité indépendante de la taille (equal mobility) qui nécessiterait la valeur -1.

En effet, la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique doit être proportionnelle à d_i pour que le transport débute en même temps pour toutes les tailles de grain. Un exposant égal à -1 revient à exprimer τ_c uniquement en fonction du d_{50} .

BATHURST (1987) a effectué une recherche sur la même base que PARKER en considérant le débit unitaire critique. A partir de données issues de rivières torrentielles ($3 < I < 6\%$) il trouve que d_a est très proche de d_{50} et il met en évidence l'influence de l'étendue granulométrique exprimée par d_{84}/d_{16} . Il obtient finalement une relation de la forme :

$$q_{ci} = a d_i^b \dots\dots\dots (2-61)$$

avec

$$b = 1.5 \left(\frac{d_{84}}{d_{16}}\right)^{-1} \dots\dots\dots (2-62)$$

si $\frac{d_{84}}{d_{16}} = 10$ alors $b = 0.15$ ce qui correspond à un exposant du coefficient de masquage d'environ -0.85 c'est à dire une valeur très proche de celle D'ANDREWS.

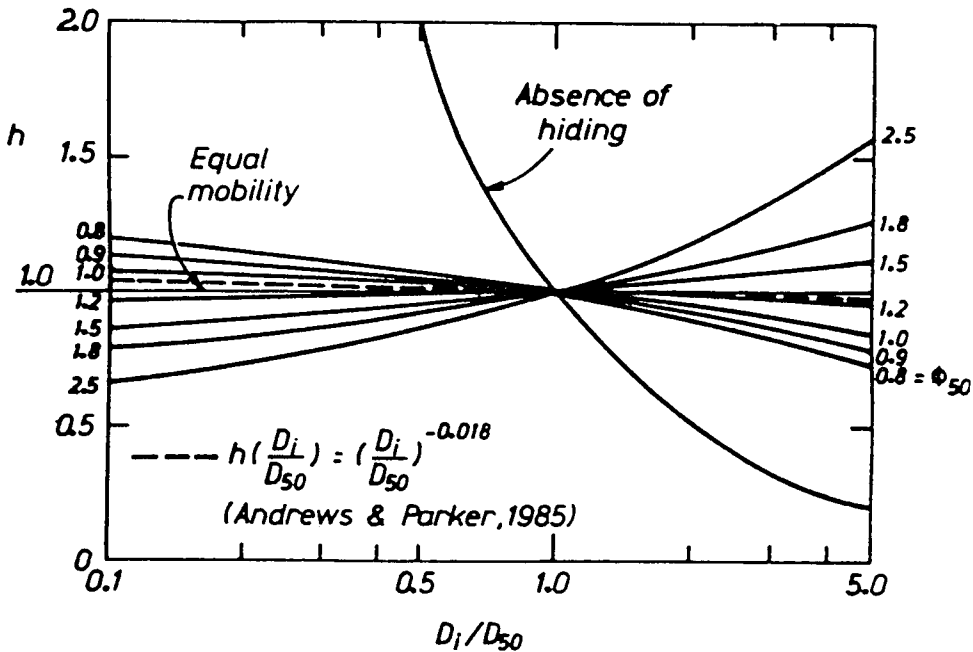


Figure 2-18 : Confrontation de différents coefficients de masquage (d'après SIMON 1986)

EGIAZAROFF (1965) considère l'équilibre d'un grain de forme sphérique et fait les hypothèses suivantes :

- portance de l'écoulement négligeable,
- profil de vitesse logarithmique,
- point d'application des forces hydrauliques à 0.63 d au-dessus du lit.

Il donne finalement une expression du coefficient de masquage qui dépasse l'égalité de mobilité pour faciliter le transport des particules importantes (voir figure suivante) :

Il propose finalement :

$$\tau_{*ci} = \frac{0.1}{\left(\log \frac{19d_i}{d_m}\right)^2} \dots\dots\dots(2-63)$$

Une telle formulation, tend vers l'égalité de mobilité en facilitant le transport des éléments moyens. Dans sa démarche EGIAROFF considère que le point d'application des forces est à une distance du lit proportionnelle au diamètre du grain, c'est à dire qu'il admet que tous les grains ont la même protubérance par rapport au lit. Or les éléments sont d'autant plus enfoncés dans le lit qu'ils sont gros (RAUDKIVI & ETTEMA - 1982). D'autre part, l'analyse de cette formulation par SIMON (1986) montre que les bases théoriques d'un tel développement ne sont pas plausibles, en particulier parce

qu'Egiazaroff ne distingue pas un grain posé sur un lit fixe, d'un élément au sein d'une couche de transport.

Toutes ces formulations sont indépendantes des conditions hydrauliques. Or, il semble que le tri granulométrique dépend grandement des contraintes exercées sur les grains et du débit solide. Ainsi, pour des rivières à fond de gravier, DISPLAS a montré l'influence des conditions hydrauliques à travers Φ_{50} qui s'exprime par :

$$\Phi_{50} = \frac{\frac{RI}{(s-1)d_{50}}}{\frac{\tau_c}{\rho g(s-1)d_{50}}} = \frac{\tau}{\tau_c} \dots\dots\dots (2-64)$$

Cette conception est conforme aux observations sur le terrain : le tri granulométrique se produit pour des écoulements relativement faibles alors que, lorsque la contrainte de cisaillement est largement supérieure à la valeur critique, tous les matériaux sont transportés (écoulement hyperconcentré).

Suite à des essais en canal avec fond de graviers il propose le coefficient de masquage h_i tel que

$$h_i(\Phi_{50}, \frac{d_i}{d_{50}}) = \left(\Phi_{50} \left(\left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^{0.3224} - 1 \right) \times \left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^{-0.0606} \right) \left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^{0.3214} \dots\dots\dots (2-65)$$

Plus que le résultat, c'est l'évolution du facteur de masquage avec les conditions hydrauliques qu'il faut retenir de cette étude. Ce phénomène est clairement montré par SUZUKI & KATO (1989). Ceux ci ont en effet observé une nette évolution de la granulométrie du lit en fonction des conditions hydrauliques qu'ils appliquaient dans un canal avec une pente d'environ 1 %.

Enfin JAMES et al. (1990) ont réalisé une suite d'expériences pour étudier le phénomène de dissimulation des petits grains par les grands. Dans un premier temps ils ont construit des lits de rugosités différentes en collant des matériaux de forme connue et de granulométrie étendue. Après avoir déposé du matériau plus fin sur ces lits, ils établissent un écoulement nettement supérieur à celui de début d'entraînement. Lorsque le débit solide s'annule, ils arrêtent l'expérience et mesurent la quantité de matériaux retenus et sa granulométrie. Ils obtiennent les résultats suivants :

- plus les matériaux du lit initial sont grossiers plus la masse retenue est importante,
- cette masse est nettement plus importante lorsque ces matériaux sont anguleux,
- le diamètre moyen des sables restants est inférieur à celui du sable déposé sur le fond avant le début de l'écoulement,
- la granulométrie des matériaux restants est d'autant plus bimodale que le sédiment du lit est grossier,

Cette expérience montre que la micro géométrie du lit est capitale et que les modèles précédents restent extrêmement grossiers vis-à-vis de la réalité physique.

2.6.3. Transport solide

Un autre point de vue prend en compte l'effet de dissimulation / exposition au niveau du débit solide. Il semble en effet plus rationnel de considérer que, les éléments du lit étant liés, le début de mouvement est le même pour tous et que le débit solide de chaque tranche granulométrique est affecté par cet effet de masquage.

Ainsi RAHUEL (1988) s'attachant aux rivières pondère le débit solide de la classe d_i par le rapport $\left(\frac{d_i}{d_{50}}\right)^{0.85}$. L'utilisation d'un modèle numérique utilisant cette équation sur le tiers central du Rhône a donné de bons résultats.

De même SILVIO & PEVIANI (1989) pour des rivières torrentielles utilisent le coefficient suivant pour pondérer le débit solide de chaque classe :

$$r_i = \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^s \dots\dots\dots (2-66)$$

$s=0,8$

Leur modèle donne un bon suivi à long terme d'une rivière torrentielle. Ainsi, il ne s'agit que d'un coefficient moyen, concernant l'ensemble des crues. Il convient de noter qu'ils utilisent le diamètre moyen des matériaux plutôt que le d_{50} . Il semble en effet que ce sont les éléments un peu plus gros que le diamètre médian (et donc proches du diamètre moyen) qui sont révélateurs de la mobilité d'ensemble.

Cependant, il semble qu'une granulométrie étendue permet le développement d'autres phénomènes. Ainsi, LISLE (1990) relate les travaux d'ISEYA & IKEYA selon lesquels le sable dans de faibles proportions peut augmenter le transport de graviers par la création locale de surfaces lisses sur lesquelles les éléments plus grossiers sont rapidement transportés. A partir des travaux de WITHING & DIETRICH (1985), il décrit le transport solide de granulométrie étendue ainsi :

"Les nappes sont des accumulations migrantes d'éléments de charriage d'une épaisseur de 1 à 2 diamètres de grains alternant entre des particules fines et grossières. Cette forme contient plus de 50% de sable.

Les nappes se forment quand le sable et le gravier se séparent en deux zones mobiles de faible rugosité de grains (sable) et de grande rugosité (gravier). Les graviers se déplacent rapidement le long des zones lisses de sables et s'agglomèrent brutalement à l'aval ou d'autres particules de graviers créent une friction inter granulaire importante.

L'assemblage, le transport et le dépôt de nappes sont imprévisibles et discontinus. Ils expliquent les fortes variations du transport de graviers et brouillent les tentatives d'explications du transport solide par les variables hydrauliques.

Le rôle de la rugosité des grains dans la formation des nappes suggère qu'il s'agit d'un facteur important dans le dépôt et les caractéristiques des biefs."

D'après BUNTE (1990) qui a mesuré le charriage dans une rivière torrentielle avec des nasses de grandes dimensions, le caractère instable du transport solide est entretenu par les variations de rugosité des éléments transportés. Le processus serait le suivant :

- les gros éléments se déposent dans une zone de moindre contrainte de cisaillement,
- la rugosité dans cette zone augmente et les matériaux fins s'y déposent,
- le dépôt amplifie localement la contrainte de cisaillement,
- les éléments sont déplacés vers une autre zone de moindre contrainte de cisaillement et un nouveau cycle démarre.

Ces hypothèses sont étayées par l'analyse des moments de la distribution granulométrique des échantillons prélevés après avoir distingué les mesures en fonction de la période du prélèvement pendant la crue.

Cette hypothèse est remarquablement cohérente avec les résultats de WHITTAKER (1987) sur un modèle réduit reproduisant une structure en marches d'escalier. Il a observé de fortes variations de débit solide en aval de son canal d'essai alors que celui introduit en amont était constant, comme le débit liquide. D'autre part, il note les variations de stockage d'éléments dans les mouilles, là où la contrainte de cisaillement est la plus faible pour les eaux moyennes.

REITZER & SCRIVENER (1989) ont étudié le transport d'éléments en conduite en vue d'applications industrielles. Les résultats qu'ils obtiennent restent intéressants pour la compréhension physique des phénomènes. Ils ont considéré, entre autres, l'évolution des pertes de charge en fonction de la concentration en sédiments. Ils obtiennent les résultats suivants à partir d'expérimentations en conduite en utilisant des billes de verre de différents diamètres (dans leurs expériences, la pente de la ligne d'énergie peut atteindre 100%) :

- un changement de comportement pour une concentration d'environ 3% ce qui correspondrait à un changement brutal de la distance entre les particules (figure 2-19).
- L'influence de la concentration diminue avec la vitesse de l'écoulement (figure 2-21).
- L'ajout de petites particules ($d=0.1$ mm) à des plus grosses ($d=1.4$ mm) réduit considérablement les pertes de charge (figure 2-21)! Ils expliquent ce phénomène par une modification de la structure de l'écoulement par la turbulence, ou par les propriétés de la suspension. Ces réductions sont d'autant plus importantes que la vitesse est faible et concernent apparemment plus la saltation que la suspension. Enfin, comme le montre la figure il apparaît une concentration en éléments fins pour laquelle cet effet est maximum.

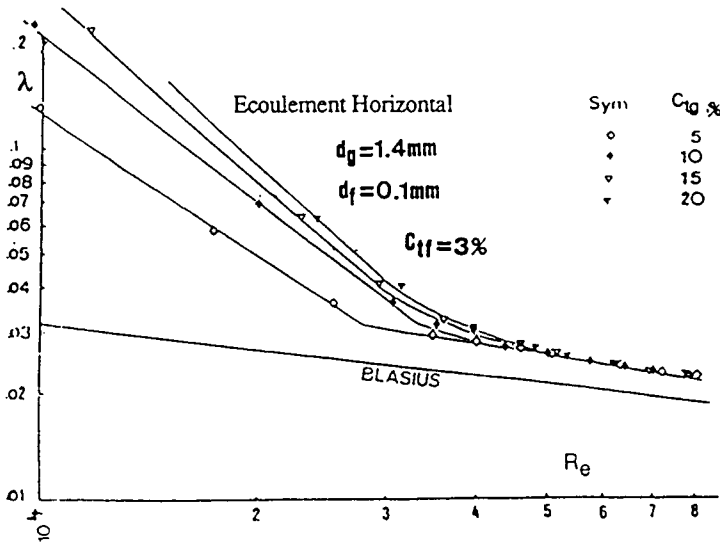


Figure 2-19 :
changement de comportement lorsque la concentration en matériaux solides atteint 3%. L'ordonnée correspond à l'ajout relatif de perte de charge due aux particules.

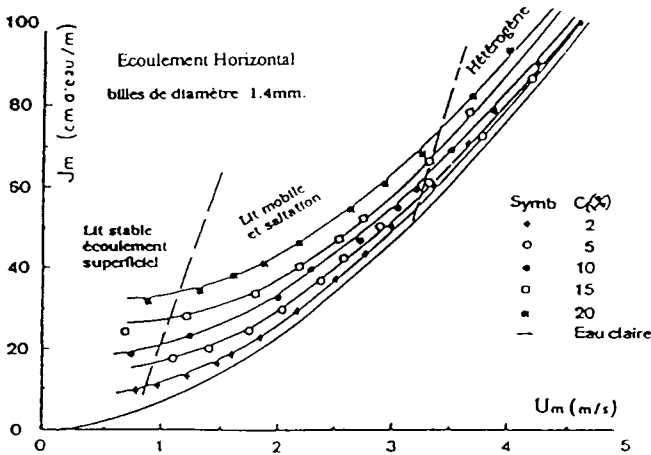


Figure 2-20 :
Diminution de l'influence de la concentration avec la vitesse de l'écoulement

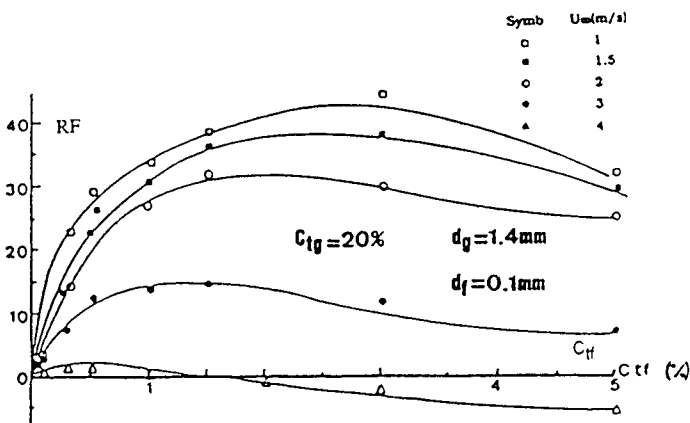


Figure 2-21 :
diminution des pertes de charges par ajout de particules fines

RF est la différence relative de pertes de charge entre un écoulement avec particules et un écoulement sans.

2.6.4. Synthèse

La granulométrie étendue apparaît comme une caractéristique incontournable des torrents. Cependant, son influence sur les phénomènes torrentiels est encore très mal connue.

On a vu au paragraphe 2.3 que l'effet des grosses particules sur la distribution de vitesse était particulièrement complexe aboutissant à un écoulement "troublé" avec des zones de ressaut ou de sillage derrière les gros éléments.

D'autre part, le début de mouvement ou le transport des matériaux de tailles différentes montre clairement les limites des approches considérant une taille de grains uniforme.

Des coefficients correcteurs ont été appliqués aux formules classiques, uniformisant la mobilité des grains, les diamètres de l'ordre du d_{50} ne subissant pas de changement.

Cependant, il apparaît que la mobilité relative des grains dépend de l'ensemble de la distribution des tailles (et même de considérations géométriques d'arrangement des grains) mais aussi des conditions hydrauliques.

Enfin, il semble que le transport solide d'une granulométrie étendue est intrinsèquement instable, les éléments grossiers et fins se déplaçant en alternance suivant des nappes de granulométries resserrées mais interdépendantes.

Ce phénomène est lié à des évolutions morphologiques. Cet aspect de l'hydraulique torrentielle qui est abordé par la suite.

2.7. Morphologie

L'étude de la morphologie et de la dynamique fluviale est très ancienne. Elle s'est principalement développée pour les cours d'eau à méandres. En effet, leurs divagations sont nombreuses, fréquentes et particulièrement destructrices. La compréhension puis la maîtrise de ces phénomènes est donc capitale. Cependant, il s'agit d'une tâche particulièrement complexe car la dynamique intègre sur une longue période les difficultés propres au transport solide et aux changements de régime.

Etant donnée la difficulté de cette approche, les recherches dans le domaine torrentiel sont très rares. C'est pourquoi, l'étude bibliographique est largement consacrée à la morphologie fluviale, en espérant pouvoir ensuite utiliser des méthodes mises au point pour les cours d'eau à faible pente.

1. Dans une première partie, il est intéressant de présenter des théories générales concernant la dynamique fluviale. Celle qu'a développée YANG (1989) ces dernières années, semble intéressante par sa souplesse et sa facilité d'utilisation. Elle est considérée comme un exemple des études morphologiques, et la démarche proposée pourrait l'être, à partir d'une approche telle que celle de RAMETTE. Cette théorie est représentative des études sur la morphologie fluviale. Auparavant, d'autres démarches seront exposées plus sommairement.
2. Une seconde partie traitera des particularités de la morphologie des torrents et de leurs effets sur les conditions d'écoulement ou le transport solide.

Cependant, les études sur la morphologie sont toutes confrontées à la même question : quel débit liquide considérer? Ce point est abordé avant les autres car il n'est généralement pas considéré dans les études morphologiques.

2.7.1. Notion de débit dominant

La plupart des auteurs considèrent que les lits sont formés par des débits rares mais non exceptionnels. Cependant, il est difficile d'être plus précis et RAMETTE (1979) par exemple considère que chaque cas est à étudier. Le débit responsable de ces évolutions est appelé **débit dominant**.

RICHARDS (1982) a regroupé les observations réalisées à ce sujet, essentiellement dans les pays anglo-saxons. La première difficulté concerne la définition du débit dominant. Certains (HEY - 1978) le considèrent comme le débit qui - en moyenne - déplace le plus gros volume de matériaux.

D'autres (CHARLSTON 1965) le définissent par rapport à des considérations morphologiques (débit le mieux corrélé avec la longueur d'onde des méandres).

Cependant, il semblerait, à la suite d'essais sur modèle réduit que le débit de plein bord est celui qui représente le mieux la valeur du débit dominant (ACKERS & CHARLSTON 1970).

Si en 1957 LEOPOLD & WOLMAN ont avancé l'idée que le débit de plein bord - et donc le débit dominant - correspondait à un temps de retour de 1 à 2 ans, il est apparu depuis que la réalité était plus complexe. Ainsi, HARVEY (1969) et HEY (1975) ont

observé que le temps de retour évolue systématiquement de l'amont vers l'aval. KILPATRICK & BARNES (1964) ont suggéré que le débit dominant pouvait dépendre de la pente.

Des études plus poussées sur ses caractéristiques montrent qu'il s'agit d'un paramètre local qui n'est associé ni à un temps de retour ni même au débit solide.

Ainsi, PETIT & DAXHELET à partir de l'étude de rivières de Belgique ont montré que ce débit augmente avec :

- la taille du bassin versant,
- les précipitations annuelles,
- le contraste du régime,
- la diminution de la taille des grains.

Quant à la fréquence de ce débit, elle augmente avec :

- la diminution de la taille du bassin versant,
- la diminution du diamètre des grains.

Cependant, DURY (1973) considère que la durée de retour du débit de plein bord est égale à 1.58 ans, ce qui correspond, dans une distribution de Gumbel, à la valeur la plus probable du maximum annuel.

Finalement, ALBERT (1992) qui a réalisé une étude bibliographique à ce sujet conclut en citant WILLIAMS (1978) :

"la distribution des périodes de retour du débit de plein bord est centrée sur la valeur $T = 1.58$ ans, mais elle est trop variable pour que l'on puisse admettre l'hypothèse d'une période de retour unique pour toutes les rivières."

En fait, la durée du débit dominant semble aussi importante que sa valeur instantanée. Ainsi, pour les rivières de montagne il semble bien que le débit de fonte des neiges soit responsable de l'essentiel de la morphologie.

L'étude des grandes crues (Tech 1940, Guil 1957) montre qu'une rivière ou un torrent déséquilibré par un événement exceptionnel demande plusieurs dizaines d'années pour retrouver un état plus stable. La dynamique fluviale serait donc une suite d'ajustements, le cours d'eau n'étant jamais réellement à l'équilibre puisque celui ci correspondrait à un débit constant. Dans ce cadre, la notion de débit dominant correspondrait au débit assez fort pour permettre de déplacer les sédiments formant le lit, mais assez réduit pour ne pas bouleverser le chenal et établir un autre déséquilibre.

Ainsi, entre l'hydrologue pour lequel l'écoulement est une grandeur statistique et l'hydraulicien qui considère un débit constant, il est difficile de choisir, la réalité étant plus complexe. Cependant, on considère fréquemment que le temps de retour du débit "dominant" est de l'ordre d'une année, même s'il est très dépendant des sites.

2.7.2. Différentes approches

Il s'agit là de présenter un panorama partiel d'outils utilisés pour étudier la morphologie fluviale. En effet, ce sont des phénomènes extrêmement complexes (et inconnus) qui commandent le tracé d'un lit. En supposant connues les caractéristiques locales du transport solide et des phénomènes d'érosion et de dépôt (ce qui n'est pas le cas), il y a encore une difficulté supplémentaire à connaître les phénomènes qui conduisent aux caractéristiques morphologiques (méandres, proportion de la section, etc...).

Certains chercheurs ont donc abandonné l'idée d'expliquer le **pourquoi** des évolutions morphologiques et se sont attachés à savoir **comment** ces changements s'effectuaient. L'intérêt d'une telle démarche est évident puisqu'elle permet de concevoir des aménagements stables (ou du moins qui ne perturbent pas fondamentalement la dynamique du cours d'eau).

Cette approche a conduit à définir une fonction que les cours d'eau cherchent à minimiser lorsqu'ils s'approchent d'une morphologie stable. Il s'agit d'une approche très différente de celles qui ont été exposées jusqu'ici. En effet, les paragraphes précédents exposaient, dans le détail, les différents effets mécaniques que l'on rencontre en torrent. Ici, on considère le cours d'eau de façon beaucoup plus globale.

Tous ces travaux concernent uniquement le domaine fluvial et sont basés sur des expérimentations à faible pente et forte submersion relative. Leur application à l'hydraulique torrentielle est incertaine car les hypothèses de base de ces principes sont généralement élaborées à partir de conditions hydrauliques très éloignées des observations à forte pente.

Une autre démarche, basée sur des modèles mathématiques complexes permet d'approcher la dynamique fluviale. Cependant, il s'agit seulement de cas très simples comme le montre le paragraphe 2.7.2.5. De plus, les modèles mathématiques manquent encore de base physique satisfaisante et présentent, par le calage de nombreux paramètres, une trop grande souplesse pour pouvoir être facilement utilisés avec rigueur.

2.7.2.1. approches empiriques

Il s'agit de formules établies sans aucun fondement théorique à partir de l'observation du comportement des rivières. La plupart expriment une proportionnalité entre des facteurs globaux de l'écoulement reflétant les tendances du cours d'eau. Certaines, comme celle de FARGUE, ne considèrent que des paramètres géométriques, alors que d'autres incluent les conditions d'écoulements. Par exemple, LANE (1955) propose :

$$QI \equiv Q_s d \dots\dots\dots(2-67)$$

Généralement de telles formules ne fournissent que des résultats qualitatifs et ne sont applicables que pour le type de rivière sur lesquelles elles ont été calées. Elles sont d'un intérêt purement pratique.

2.7.2.2. approches énergétiques

L'approche énergétique est très séduisante car elle permet d'aborder globalement les phénomènes. Elle a été abordée de plusieurs façons (la théorie de YANG sera analysée ultérieurement) :

JEFFERSON, SCHOKLITSCH, entre autres, considèrent que les lits en méandres permettent de mieux dissiper l'énergie du cours d'eau qu'un bief rectiligne. Cependant, les comparaisons effectuées en laboratoire entre la rugosité des lits rectilignes et celle des chenaux légèrement courbés n'a pas mis en évidence de différence significative.

LEOPOLD & LANGBEIN (1962) ont introduit le parallélisme entre une rivière et le flambage d'une bande d'acier qui correspond à la dépense énergétique minimale. La rivière prendrait alors le chemin le plus probable équivalent à la moindre dépense énergétique globale. Les courbes obtenues sont très ressemblantes, mais l'énergie globale dépensée par le cours d'eau ne peut être minimisée car elle correspond à la dénivelée entre la source et la mer.

2.7.2.3. nombre de Froude

RAMETTE (1981) a développé une théorie basée sur l'utilisation du nombre de Froude. Il considère qu'une rivière à faible pente (nombre de Froude très inférieur à l'unité) adapte sa morphologie pour se rapprocher du régime critique. Les résultats obtenus, bien qu'ils ne soient pas fondés sur une théorie rigoureuse, sont assez proches de la réalité et semblent bien adaptés aux variations de morphologie.

En fait, il y a une bonne correspondance avec la théorie de YANG : La recherche d'un nombre de Froude proche de l'unité est équivalente à la minimisation de la charge de l'écoulement.

Cependant, RAMETTE ajoute deux autres conditions : la saturation du débit solide et l'écoulement à plein bord. Il montre qu'il y a équivalence entre la saturation du débit solide et le nombre de Froude maximum.

Dans le cas des torrents, cette théorie correspond parfaitement au cas de l'écoulement troublé où le nombre de Froude oscille autour de l'unité en liaison avec la morphologie en marches d'escalier. De plus, les expériences sur les seuils RTM ont montré (SOGREAH -1988) - aux imprécisions de mesure près - que le nombre de Froude reste proche de l'unité.

Les observations montrent aussi des écoulements nettement torrentiels en particulier lors des crues. Il n'y a cependant pas de contradiction, car il est difficile de penser que le cours d'eau est alors à l'équilibre.

2.7.2.4. variance minimale

ORSBORN & STYPULA (1987) ont développé un modèle régional pour les bassins de l'Oregon. Ils considèrent les équations suivantes en une section donnée de la rivière :

$$B = a Q^b$$

$$h = c Q^f \dots\dots\dots (2-68)$$

$$U = k Q^m$$

L'expression du débit montre que $ack=1$ & $b+f+m=1$

Ils utilisent ensuite une dernière équation fournie par la théorie de LANGBEIN (1964) qui postule que la variance des exposants est minimum :

$$b^2+f^2+m^2 \text{ minimum} \dots\dots\dots(2-69)$$

Ils expriment les valeurs moyennes des coefficients pour 10 stations régionales. Ceux ci variant du simple au double d'une station à l'autre, la validité de ces hypothèses semble discutable.

La forme de la section est estimée en considérant qu'un canal transporte d'autant plus que la section de l'écoulement est réduite pour un débit donné (cela est contraire aux résultats de RAMETTE). L'étude de la relation entre le rapport B/h et p²/A montre que le rapport B/h est supérieur pour un canal naturel que pour une section rectangulaire à cause de l'instabilité des berges qui donne une forme trapézoïdale à la section.

En combinant avec le premier jeu de trois relations (2-68) calées régionalement, on obtient la relation entre la moyenne annuelle de l'écoulement et la forme du canal. Par exemple :

$$7.5 \frac{\sqrt{Q}}{h} = \frac{p^2}{A} - 2 + \frac{2h}{B} \dots\dots\dots(2-70)$$

Sur trois sous bassins, ces relations ont été vérifiées et donnent apparemment de bons résultats.

2.7.2.5. Approche microscopique

Une étude plus physique des phénomènes est a priori séduisante. En considérant la répartition de la contrainte de cisaillement, des résultats intéressants peuvent être obtenus. Cependant la complexité de la réalité physique - courants secondaires par exemple - limite la portée de telles études. La difficulté est d'expliquer des berges stables alors que le transport solide reste important sur le lit⁸.

D'autre part, de telles études n'ont concerné que l'approche des proportions de la section transversale. Les morphologies plus complexes comme les méandres ou les bancs de sable ne sont pas encore accessibles par ce type d'approche. Enfin, le calcul n'est possible que dans le cas d'un lit ou la cohésion, l'étendue granulométrique et l'imbrication des grains sont négligeables.

Des modèles très fins, à la suite des travaux de PARKER (1978) ont été développés. Ces analyses ne sont valables que pour des biefs rectilignes. Par exemple, IKEDA & IZUMI (1990) ont ainsi étudié l'effet de la végétation sur les dimensions des sections types. Leur démarche, représentative de ce type de travaux, est explicitée dans ses grandes lignes.

Le profil des berges est obtenu à partir de :

- l'équation d'équilibre d'un grain,
- la distribution de quantité de mouvement,

⁸ Il s'agit plutôt du transport "ordinaire" dans une rivière - pour des débits inférieurs à ceux des crues - c'est à dire sans changement notable de la morphologie et du tracé du lit.

- une expression de la résistance à l'écoulement et la formule :

$$\tau = \rho C_f U^2 \dots\dots\dots (2-71)$$

C_f est coefficient de frottement

- Un indice correspondant à la densité de végétation sur les berges.

Ces calculs sont réalisés en négligeant le terme de diffusion.

La distribution de vitesse est nécessaire pour connaître la distribution des contraintes. On utilise habituellement le profil logarithmique, mais celui ci n'est plus valable à cause de la végétation près des berges. C'est donc le concept de transfert de quantité de mouvement par les tourbillons qui est utilisé. Cette démarche est intéressante car elle pourrait être adaptée au cas des écoulements en torrent à faible submersion relative.

IKEDA & IZUMI trouvent que la contrainte de cisaillement est de 23 % supérieure au centre de la section qu'en pied de berge ce qui explique qu'en basses eaux, le transport se fasse uniquement au milieu de la rivière.

La largeur et la hauteur stables sont déterminées successivement.

- La hauteur est calculée pour être à la limite de stabilité en pied de berge pour le d_{90} en utilisant le paramètre de Shields et le coefficient de masquage de PARKER.
- La largeur est déterminée pour retrouver la contrainte de cisaillement globale à partir de chaque partie du lit.

Apparemment, les résultats obtenus correspondent remarquablement bien aux mesures de terrain. L'intérêt de ce type d'approche est qu'il permet de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu.

PIZZUTO (1990) a développé un modèle numérique basé sur des hypothèses similaires mais en considérant l'évolution du lit en fonction du temps.

Les principales étapes du calcul à chaque pas de temps sont les suivantes :

- détermination de la distribution de contrainte de cisaillement par une équation de distribution de quantité de mouvement (en considérant un écoulement complètement rugueux et une résistance des formes du lit négligeable),
- calcul du transport solide par la formule de PARKER puis de l'évolution du lit,
- Utilisation d'un modèle d'effondrement de berges,

Il vérifie ainsi que le fond du lit est plat. Pour le profil des berges, il retrouve la forme sinusoïdale classiquement admise par PARKER, DISPLAS, IKEDA... L'augmentation de l'angle au repos accroît la profondeur d'équilibre.

La comparaison avec des expériences menées en laboratoire par DISPLAS et IKEDA a été réalisée : partant d'un lit anormalement profond, PIZZUTO suit son élargissement progressif par érosion des berges. Pour pouvoir considérer un lit peu sinueux et rester dans un schéma bidimensionnel, comme dans leur modèle, une paroi lisse représente le centre du chenal.

Les différences obtenues pour la largeur et la hauteur de la section mouillée sont expliquées par la définition du concept d'état d'équilibre :

- Sur modèle, l'équilibre est considéré comme atteint quand l'évolution semble terminée. Les incertitudes des mesures expliquent que les essais soient rapidement arrêtés.
- Au contraire, avec un modèle numérique, la convergence n'est atteinte que beaucoup plus tardivement. Or les calculs montrent que, si l'évolution est lente, elle n'est négligeable que très tardivement.

2.7.3. Cas de l'approche de la puissance unitaire d'écoulement

A partir des multiples communications à ce sujet, ce paragraphe tente de restructurer cette théorie. Tous les articles sont tirés de :

ADVANCED COURSE ON FLUVIAL AND SEDIMENT HYDRAULICS

*Lecturer : Chih Ted YANG
November 7-9, 1989
Beijing, China
Publication IRTCES*

2.7.3.1. théorie générale

2.7.3.1.1. introduction

La théorie de YANG, comme la plupart des approches morphologiques est basée sur un concept énergétique en considérant les lois générales de la physique. Il considère l'analogie suivante avec un système thermique fermé et dissipatif :

température	↔	altitude dans le cours d'eau
énergie thermique	↔	énergie potentielle

Il n'a cependant pas démontré cette analogie et l'essentiel de son travail consiste à montrer la cohérence de ses hypothèses avec l'ensemble des théories liées aux cours d'eau.

2.7.3.1.2. minimum de dissipation de puissance

YANG a repris les considérations énergétiques en prenant en compte l'énergie potentielle qui est la seule intervenant dans un cours d'eau. Par analogie avec un système thermique, il en déduit que :

$$dY/dt = \text{minimum} \dots\dots\dots (2-72)$$

avec Y énergie potentielle

Cependant, pour respecter l'analogie, il est nécessaire de considérer un système fermé ce qui n'est pas le cas d'une rivière. YANG tourne la difficulté en considérant que le

bief étudié relie deux réservoirs de capacité infinie. Il est donc nécessaire de considérer l'ensemble de ces trois éléments.

YANG considère la théorie du minimum de dissipation d'énergie. Il l'énonce de la façon suivante :

"Pour un système fermé et dissipatif dans un équilibre dynamique stable, la dissipation totale d'énergie est à son minimum pour les contraintes appliquées au système."

Pour valider cette hypothèse, le lien entre la moindre dissipation d'énergie et les équations de NAVIER-STOKES a été établi dans certains cas d'écoulement. Il est nécessaire à la démonstration que les forces d'inertie soient négligeables par rapport à celles de cisaillement et de gravité (nombre de Froude assez faible). On obtient alors que l'écoulement qui suit l'équation de NAVIER-STOKES minimise la dissipation d'énergie.

2.7.3.1.3. minimum de puissance unitaire d'écoulement P.U.E.

L'équivalence entre dissipation d'énergie et puissance unitaire d'écoulement (P.U.E.) est particulièrement utile car ce dernier concept est beaucoup plus simple d'utilisation. Le passage se fait simplement lorsque la dissipation d'énergie par le transport solide est négligeable :

$$\frac{dY}{dt} = \frac{dx}{dt} \frac{dY}{dx} = UI \quad (\text{Puissance Unitaire d'Écoulement}) \dots\dots\dots (2-73)$$

La théorie du minimum de puissance unitaire est un cas particulier de celle de moindre dissipation d'énergie. YANG en tire alors la loi suivante :

" Pour un écoulement dans un chenal alluvial de largeur donnée, lorsque la dissipation par le transport solide est négligeable, le chenal ajuste vitesse, pente, profondeur, rugosité de telle manière qu'une quantité minimum de P.U.E. soit utilisée. Cette valeur minimum dépend des contraintes appliquées au chenal."

2.7.3.2. applications morphologiques

2.7.3.2.1. introduction

La plupart des résultats ont été obtenus en modélisant un bief afin de lui donner une section de la forme d'une partie de disque. Ensuite, une étude de sensibilité est réalisée pour chaque facteur et le lien avec la puissance unitaire d'écoulement est mis en évidence.

2.7.3.2.2. méandres

C'est pour l'explication du tracé des méandres que les théories de YANG sont les plus performantes. En se basant sur la loi de moindre P.U.E., et en décrivant les différents paramètres du bief, il montre les évolutions d'un cours d'eau en fonction des contraintes extérieures.

Comme il s'agit de diminuer le produit U.I, les méandres apportent une solution très satisfaisante car ils diminuent directement la pente mais aussi, par voie de conséquence, la vitesse. Il s'agit donc, pour le cours d'eau, d'un moyen idéal de réduire sa P.U.E..

2.7.3.2.3. alternances seuil / mouille

La théorie de moindre P.U.E. permet d'expliquer facilement les alternances de seuil et de mouille. Celles ci sont définies comme une variation importante de la pente d'énergie.

A partir d'équations simples de perte de charge, YANG montre que, pour une rugosité constante, un parcours avec une rupture de pente minimise la P.U.E. par rapport au même trajet effectué avec une pente constante.

Cependant, la configuration adoptée dépendant des contraintes appliquées sur le système et il ne semble pas possible de quantifier la structure ni de définir de limite au développement de ces alternances.

Un aspect important concerne la relation entre variations transversales (méandres) et variations verticales (seuil - mouille). Il s'agirait, en effet de réponses différentes à la même recherche de minimisation par la rivière.

2.7.3.2.4. proportions de la section transversale

En considérant une section transversale de la forme d'une partie de disque, YANG montre que le canal augmente sa largeur afin de minimiser la dissipation d'énergie. L'effet est alors le même que par la formation de méandres.

Les deux phénomènes agissent généralement de pair et les chenaux à méandres sont généralement plus larges que les chenaux droits pour un débit équivalent.

Une autre approche consiste à déterminer les paramètres de LEOPOLD & MADDOCK (1953) exprimant les relations hydrauliques au niveau des stations de jaugeage :

$$B = aQ^b$$

$$h = cQ^f \dots\dots\dots (2-74)$$

$$U = kQ^m$$

Les exposants étaient initialement déterminés par la méthode de moindre variance. YANG considère une section rectangulaire et y applique l'équation de MANNING STRICKLER et son équation de transport solide. Il obtient alors que la section la plus efficace est celle pour laquelle la largeur est double de la hauteur. Il obtient finalement :

$$b = f = 9/22$$

$$m = 2/11$$

Ces valeurs correspondent aux résultats obtenus avec d'autres méthodes mais n'apportent pas d'information sur la validité de ces équations. Suivant les sites de mesure, le coefficient b varie par exemple de 0 à 0.82 pour une moyenne de 0,22.

Une autre approche, plus fine, considère une section de forme trapézoïdale et prend en compte les contraintes exercées sur le cours d'eau. La démarche est la suivante :

- la dissipation d'énergie est exprimée comme le produit du débit massique total (liquide et solide), multiplié par la pente.
- l'équation de perte de charge est celle de MANNING
- l'équation de transport solide est basée sur la P.U.E..

Trois cas sont ensuite considérés pour la minimisation de dissipation d'énergie :

1. pente des berges contraignant l'équilibre : c'est le cas de berges constituées de matériaux affouillables. Le cours d'eau est alors libre de définir sa largeur mais les berges doivent rester en équilibre (angle de repos du matériau).
2. largeur imposée : c'est le cas des rivières endiguées.
3. équilibre non contraint : le cours d'eau est alors libre d'utiliser tous les moyens pour trouver un équilibre. Dans ce cas, la section a l'aspect d'un demi hexagone. En négligeant l'effet du transport solide, on retrouve les coefficients puissances précédents.

Ces différents cas sont présentés à la figure page suivante :

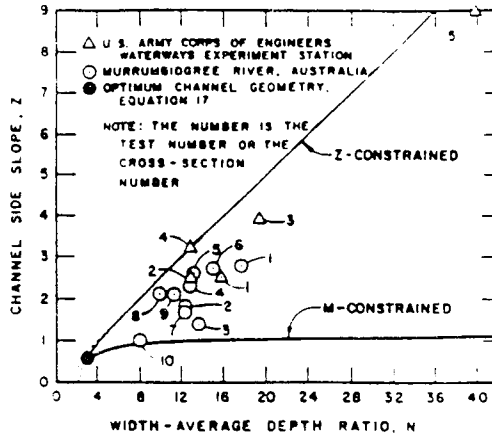


Figure 2-23 : Relation entre la pente des berges et le rapport largeur/profondeur de la section mouillée (d'après YANG 1989)

Les mesures reproduites sur le graphique montrent que les cours d'eau sont toujours situés entre les situations théoriques extrêmes (cas 1 et 3).

2.7.3.2.5. variation de rugosité

La variation de la rugosité a été abordée directement. Il est en effet facile de comprendre que si le cours d'eau cherche à minimiser le produit $U.I$, l'augmentation de rugosité est un moyen efficace de réduire la vitesse. Evidemment, cette augmentation dépend des contraintes extérieures exercées sur le cours d'eau.

Des progrès significatifs dans cette démarche pourraient être réalisés si la quantification des éléments disponibles pour augmenter les pertes de charge était possible et permettait de tirer des conclusions sur la répartition spatiale de la rugosité.

2.7.3.2.6. débit liquide

Le débit liquide a évidemment un rôle prépondérant sur la morphologie fluviale. YANG a montré qu'une augmentation du débit (crue) augmente la dissipation d'énergie. Le cours d'eau doit donc augmenter sa pente en réduisant sa sinuosité ou en uniformisant la pente de la ligne d'énergie. Ce comportement est classiquement observé pendant les crues.

2.7.3.3. applications annexes

A partir de ces théories, YANG a défini des équations de transport de sable et de graviers (abordé au § 2-5). De plus, il parvient à retrouver les distributions de vitesse dans l'écoulement.

2.7.4. Particularité des torrents

La morphologie torrentielle se distingue nettement de celle des rivières, et les notions et les interrogations posées par la dynamique du cours d'eau sont très différentes. Il est donc souhaitable de revenir à la distinction entre les différents types de cours d'eau. SURELL (1870) présente une classification intéressante basée sur la morphologie :

*"La première classe comprend les **rivières**. Comparées aux autres cours d'eau, les rivières portent les caractéristiques suivantes :*

Elles coulent dans des vallées larges; elles ont un assez fort volume d'eau, et des crues prolongées; leur pente, constante sur de grandes longueurs, n'excède pas 15 millimètres par mètre.

*Mais le trait le plus saillant de ces rivières est de **divaguer** sur un lit plat, très large, et dont elles n'occupent jamais qu'une très petite portion. Ce n'est pas seulement la forme de la section fluide qui se modifie et dans laquelle passe de temps en temps le talweg; c'est la masse toute entière des eaux qui abandonne son lit, le laisse tout à coup à sec, et se transporte dans le lit nouveau, à une grande distance du premier (...).*

*La deuxième classe comprend les cours d'eau que j'appellerai **rivières torrentielles**. Ils (...) forment les affluents principaux des rivières. Leurs vallées sont moins longues et plus resserrées, les variations de leur pente sont plus rapides. Leur volume d'eau est moins considérable. Ils ne divaguent pas ou divaguent peu, parce que leurs berges sont plus solides et mieux encaissées. Leur pente n'excède pas 6 centimètres par mètre (...).*

*Les **torrents** forment la troisième classe. Ils coulent dans des vallées très courtes, qui morcellent les montagnes en contre forts; quelquefois même, dans de simples dépressions. Leurs crues sont courtes et presque toujours subites. Leur pente excède 6 centimètres par mètre, sur la plus grande longueur de leur cours : elle varie très vite et ne s'abaisse pas au-dessous de 2 centimètres par mètre.*

*Ils ont une propriété tout à fait spécifique : ils **affouillent** dans la montagne; ils **déposent** dans la vallée; et ils **divaguent** ensuite, par suite de ces dépôts."*

Une telle définition apporte un élément nouveau par rapport aux approches classiquement rencontrées en rivière : l'échelle correspondant au phénomène morphologique. Alors que pour les rivières, il est possible d'étudier un élément du lit, dans le cas des torrents, il faut d'abord se situer par rapport à la structure d'ensemble du cours d'eau, l'étude localisée du lit n'étant réalisée que par la suite.

Beaucoup plus que dans les autres cas, les imbrications d'échelles sont prépondérantes dans les torrents à cause des forts gradients longitudinaux. Une fois définie la situation de la zone étudiée par rapport au fonctionnement global du bassin, l'attention est portée sur la morphologie locale. En effet, celle-ci est révélatrice non seulement du comportement passé du torrent mais aussi de sa réaction future à une sollicitation hydrologique.

Le problème des méandres, si important pour de faibles pentes, ne se pose plus qu'exceptionnellement pour les torrents, en général dans des zones de dépôt. De même, les proportions de la section mouillée, qui sont si souvent étudiées pour les rivières, ne présentent plus d'intérêt dans le cas des torrents, la réalité physique de la section mouillée étant douteuse à cause des contraintes extérieures mais aussi de la faiblesse de la submersion relative (h/d).

Finalement, pour un torrent ($I > 6\%$), les principaux paramètres morphologiques sont les suivants :

- la pente (globale mais aussi locale). La pente locale est directement liée aux formes du lit (dunes, antidunes, seuil, mouilles, etc...). C'est un élément très étudié en hydraulique fluviale. Il est traité au chapitre suivant.
- la nature de la couche de matériaux en contact avec le lit. Il s'agit de la granulométrie mais aussi de l'imbrication des éléments entre eux. C'est cet aspect et les formes du lit qui constituent le pavage.

2.7.5. Profil en long

Il s'agit là des variations à grande échelle de la pente. On observe généralement une diminution régulière de la pente vers l'aval. La détermination du profil en long et de la pente d'équilibre sont des paramètres privilégiés lors d'étude d'ouvrages en torrent.

La relation entre l'évolution de la pente et celle de la granulométrie a très vite été mise en évidence. Deux phénomènes permettent d'expliquer cette évolution :

- la première considère que l'usure des matériaux lors du transport est responsable de cette diminution du diamètre des grains et donc de la pente. Cependant la quantification de ce phénomène et la détermination de l'usure de matériaux transportés semblent difficiles.
- la seconde considère que le tri granulométrique des matériaux explique seul leur décroissance de taille vers l'aval et donc l'évolution de la pente.

La réalité physique des deux phénomènes ne fait pas de doute, mais il semble intéressant de connaître leurs importances respectives. PARKER (1989) a étudié cette question en utilisant un modèle basé sur les hypothèses suivantes :

- le lit est divisé en une couche supérieure d'épaisseur égale au d_{90} du pavage et en un substratum,
- le débit solide des différentes classes granulométriques est calculé par l'intermédiaire d'un coefficient de masquage,
- le transport des éléments plus fins que les graviers est négligé,
- l'abrasion est considérée comme se produisant lors des chocs avec les autres matériaux transportés et le lit. Des coefficients d'abrasion ont été déterminés à partir de tests suivant le type de roche,
- les phénomènes chimiques sont négligés,
- la rivière a une section constante et ne reçoit aucun tributaire.

Le modèle a été appliqué à une rivière canadienne dont les caractéristiques sont les suivantes :

- 0.12 % < I < 0.49 %
- débit bi-annual : 672 m³/s
- Deux roches dominantes sont présentes : le quartz et le calcaire. La proportion de calcaire passe de 45% en amont à 8% en aval.

Les résultats sont les suivants :

Pour le quartz, l'abrasion est négligeable et la diminution de taille est le fait du tri granulométrique. Pour le calcaire, les deux phénomènes ont une importance comparable, et la rapidité de variation de taille entraîne une rapide évolution des proportions respectives des roches.

Indépendamment des incertitudes dans les formules et le calage du modèle, les conclusions suivantes semblent fiables :

- pour les roches résistantes à l'abrasion, le tri explique seul la variation de pente,
- pour les roches plus tendres, abrasion et tri granulométrique ont une importance comparable,
- la rapide diminution de taille des roches peu résistantes explique qu'elles disparaissent rapidement vers l'aval.

Il convient cependant d'être prudent car cette approche concerne les rivières. Or, dans le torrent, les phénomènes sont différents non seulement pour les mécanismes du transport, mais surtout pour le tri granulométrique. Dans le cas extrême, on comprend parfaitement que cette approche soit sans rapport avec les processus liés aux laves torrentielles.

Une autre approche, plus proche du terrain consiste à caler des formules empiriques avec des relevés de terrain. Ainsi, HAMPEL (1977) a développé une approche du transport solide basée sur l'étude du profil en long et de la granulométrie du cône. La fiabilité de son approche n'est malheureusement pas abordée dans son ouvrage. L'équation de la diminution exponentielle de la taille des grains se trouve à la base de son étude.

Il établit une formule reliant la pente, la concentration en sédiment C et la granulométrie uniquement pour les pentes supérieures à 4% :

$$I = 2C^{0.625} + 28Cd_m \dots\dots\dots (2-75)$$

I et C sont en %

d_m est en mètre

Il considère une diminution de taille des éléments charriés suite à l'usure et en déduit le profil parabolique du cône. En suivant ce raisonnement, et en considérant la hauteur de pluie efficace h_p lors d'un épisode, il détermine le volume charrié "lors de crues catastrophiques" (il propose, pour un bon accord avec les mesures et pour tenir compte des laves torrentielles et de la suspension, de multiplier le résultat par 3,5) :

$$V_s = \frac{h_p S}{100} \left(\frac{I - 1.47 \times 160^{d_m}}{2.7} \right) (1 / (0.47 - 0.4d_m)) \dots\dots\dots (2-76)$$

S est la surface du bassin versant.

Une telle formulation semble difficilement extrapolable à d'autres torrents que ceux qui ont servi au calage.

Une autre famille de structures existe, essentiellement pour les rivières torrentielles. Il s'agit d'alternances de pentes faible et forte correspondant à des sections mouillées profondes ou non. WHITTAKER & JAEGGI (1982) considèrent que c'est une caractéristique fondamentale des cours d'eau et qu'elle joue un rôle considérable dans la stabilité du lit.

Si le terme de seuil est retenu pour les torrents, on parle plutôt de *rapides* (*Riffles* dans la littérature anglo-saxonne) lorsque la pente est plus faible et que cette structure se développe sur plusieurs dizaines de mètres. Alors, il y a seulement une augmentation de la pente et non pas une rupture de la ligne d'énergie.

2.7.6. Dessin en plan du lit

Il s'agit essentiellement d'aborder une topologie des dessins en plan à partir d'observations et non plus en établissant une théorie de minimisation d'une fonction comme c'était le cas dans les paragraphes précédents. On distingue généralement :

- lit en tresses,
- méandres,
- lit rectiligne.

Les bancs alternés sont généralement perçus comme un intermédiaire entre le lit rectiligne et le lit en tresse (MIZUYAMA 1977). La figure page suivante correspond à la distinction opérée par LEOPOLD & WOLMAN (1957).

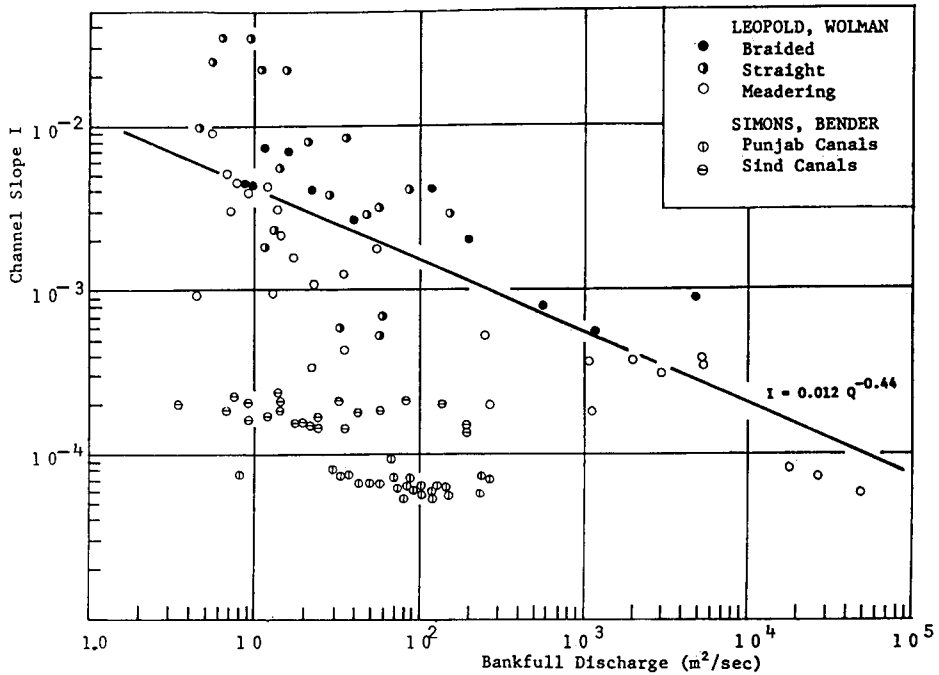


Figure 2-23 : Domaines de classification des dessins de chenaux (d'après MIZUYAMA 1977)

MIZUYAMA (1977) a effectué le même travail mais pour de plus fortes pentes. Il a relié les évolutions de morphologie aux différents types de transport solide rencontrés.

Il a réalisé son étude à partir d'essais réalisés dans un canal de 39 cm de large et de 20 m de longueur avec quatre matériaux différents.

La figure suivante montre les différentes zones qu'il propose. Elles sont détaillées par la suite.

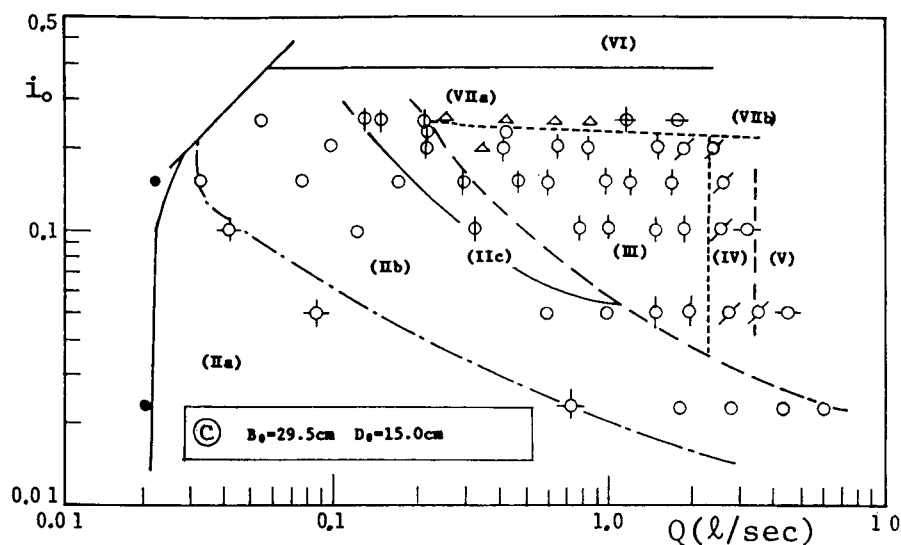


Figure 2-25 : dessin des chenaux pour une granulométrie étendue
(d'après MIZUYAMA 1977)

- I. Il s'agit du domaine d'infiltration. Le débit est proportionnel à la pente pour un même matériau.
- II. Il commence à y avoir des mouvements mais pas assez pour déplacer les plus gros éléments.
 - Dans la partie II-a, aucune particule ne se déplace.
 - La zone II-b correspond au mouvement de toutes les particules sauf les plus grosses. L'écoulement se répand alors sur toute la largeur du lit.
 - En II-c, la contrainte de cisaillement est suffisante pour que se forme un lit en tresse.
- III. C'est le domaine des méandres : l'écoulement forme un lit de largeur inférieure à celle de l'ensemble du chenal.
- IV. L'écoulement couvre à nouveau toute la largeur.
- V. Les bancs sont effacés et l'écoulement devient bi-dimensionnel. Le lit est plat.
- VI. Il y a rupture par dépassement de l'angle de frottement interne.
- VII. C'est le domaine des écoulements de boue.

2.7.7. Formes du lit

2.7.7.1. approche classique

Les formes du lit constituent un élément important des études liées au transport solide. Le cas le plus classique concerne les dunes dans les écoulements à faible pente. Pour un écoulement bi-dimensionnel, SIMONS & RICHARDSON (1966) considèrent que les différents types de configuration du lit sont - par ordre croissant de transport solide - les suivantes :

- a les rides
- b - c les dunes
- d - e le lit plat de transition
- f - g les antidunes
- e les alternances seuil- mouille.

La figure suivante illustre ces différents éléments :

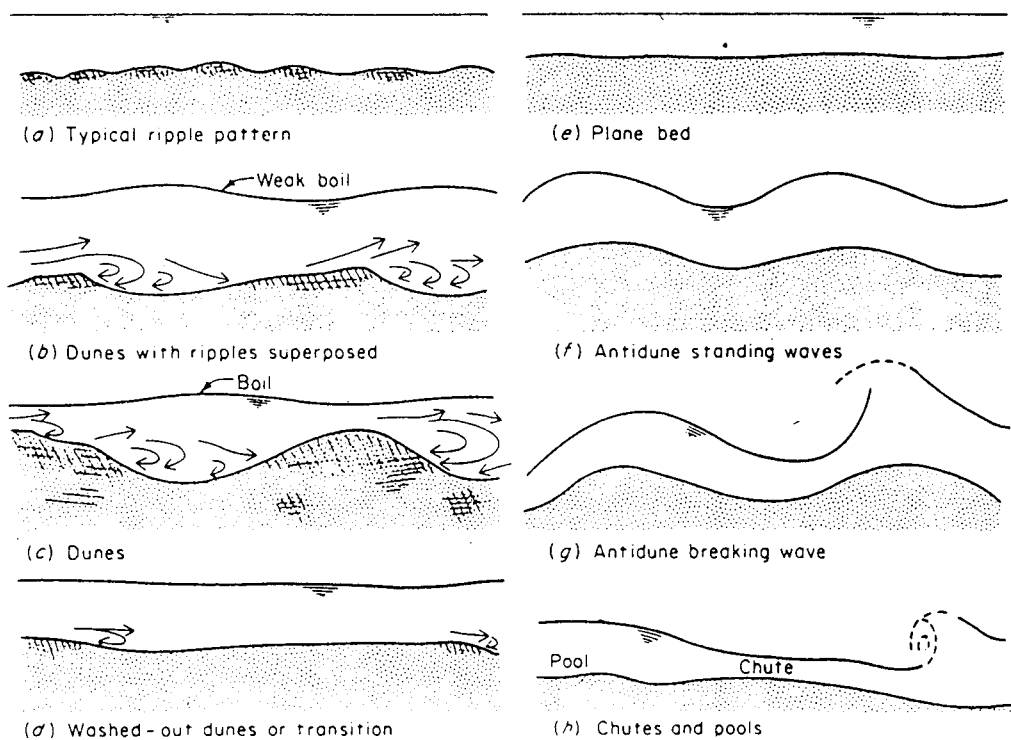


Figure 2-26 : différentes configurations du lit (d'après SIMONS & RICHARDSON - 1966)

ENGELUND & HANSEN (1967) ont conduit des expériences en canal en augmentant le débit donc la contrainte de cisaillement toutes choses égales par ailleurs. Ils ont obtenu une relation entre la vitesse de l'écoulement et la contrainte de cisaillement. Ils ont pu expliquer ces évolutions en fonction des formes du lit. Cette relation est tracée ci-dessous :

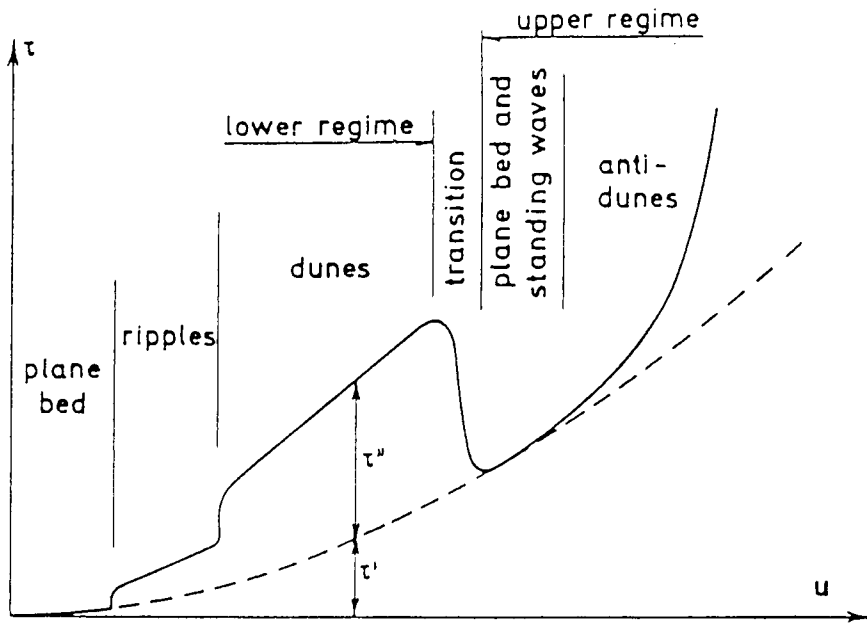


Figure 2-27 : évolution de la contrainte de cisaillement au niveau du lit en fonction de la vitesse et des formes du lit (d'après ENGELUND & HANSEN - 1967)

Ces observations les ont conduit à décomposer la contrainte de cisaillement :

$$\tau = \tau' + \tau'' \dots \dots \dots (2-77)$$

- τ' est la part de la contrainte exercée sur le matériau de base du lit. Elle correspond à la rugosité de peau.
- τ'' est la part de la contrainte exercée sur les formes du lit. Son évolution est très rapide et correspond nettement à la configuration du lit.

Il apparaît nettement que le nombre de Froude a un rôle prépondérant dans le comportement du lit face à l'écoulement. Ces aspects ont fait l'objet de très nombreuses recherches pour les lits à faible pente. Cependant, les rugosités de formes sont encore d'une application difficile pour les ingénieurs confrontés à ce type d'approche.

ASHIDA & MICHIEU (1972) considèrent un changement de comportement pour un nombre de Froude de l'ordre de 0.8. La figure suivante montre les différentes zones de fonctionnement selon les travaux de ASHIDA & MICHIEU (1972) et ceux de GARDE & RAJU (1963). Leurs travaux sont basés sur des mesures expérimentales et des approches semi-empiriques.

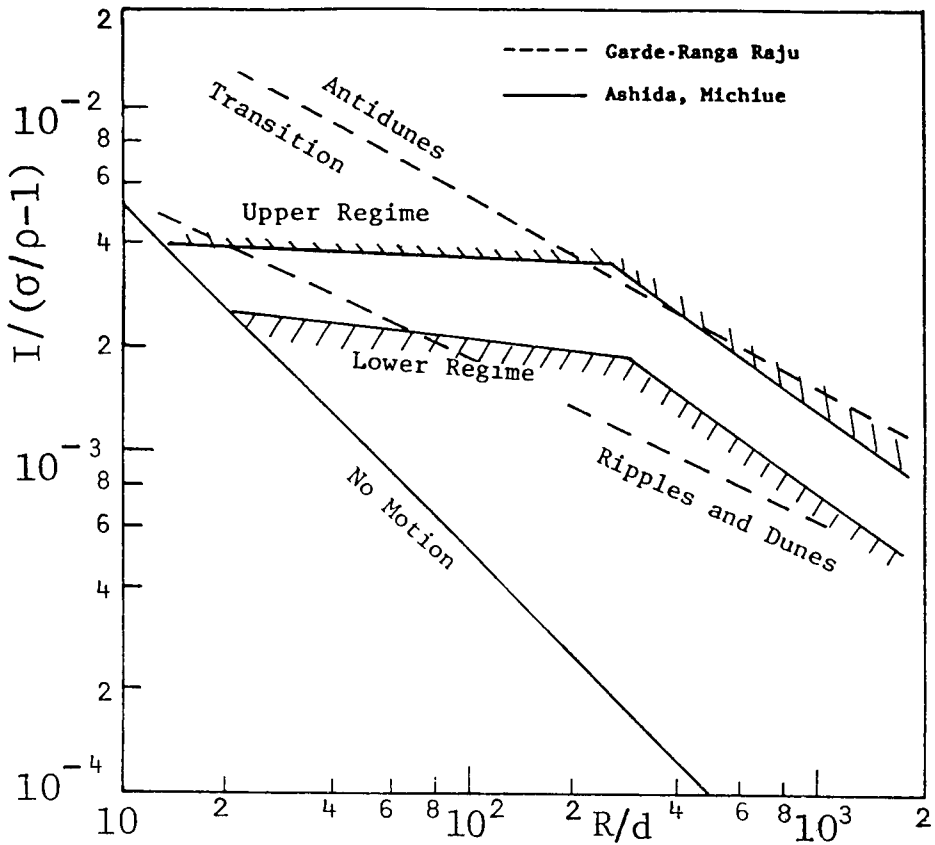


Figure 2-28 : Classification des formes de lits (d'après MIZUYAMA 1977)

Le schéma précédent montre clairement que lorsque la pente augmente et que la submersion relative diminue, deux formes de lit sont à prendre en considération :

1. le lit plat de transition
2. les antidunes.

Le passage de l'un à l'autre se produit en fonction du nombre de Froude. Les antidunes sont des structures symétriques qui progressent lentement de l'aval vers l'amont lors d'écoulement supercritique. SMART ET JAEGGI (1983) en ont observé lors de leurs essais :

"Au-dessus d'une pente de 3%, les antidunes (...) se produisent dans la plupart des tests avec le matériau I, pour quelques uns avec les matériaux II & III et une fois avec le matériau IV" Les formes du lit sont généralement faibles et se déplacent vers l'amont(...). Il a donc été considéré que ces antidunes ne produisent pas une forme supplémentaire de résistance à l'écoulement."

Les caractéristiques des matériaux sont les suivantes :

Matériaux	en mm		
	d_{90}	d_m	d_{30}
I	11.0	4.3	1.3
II	5.2	4.2	3.6
III	4.6	2.0	1.0
IV	12.1	10.5	9.0

Il apparaît donc que la formation d'antidunes ne s'explique simplement ni en fonction du diamètre moyen ni même en fonction de la granulométrie. Cependant, dans les phases de fort transport solide, il s'agit d'un phénomène très secondaire.

2.7.7.2. les dunes à fortes pentes

Il s'agit d'une forme de lit très peu étudiée. MIZUYAMA en a observé dans son canal de 29.5 cm de large. Il les décrit de la façon suivante :

"Concernant le domaine VII-a de la figure 2.25, il apparaît des phénomènes de dunes glissantes de type debris flow dans la classification de RADIO. Dans ce phénomène, les graviers se déplacent immédiatement après l'alimentation en eau générant des zones d'éléments grossiers et d'autres de fins.

Lorsque les éléments sont grossiers, la surface d'écoulement est réduite et les sédiments transportés depuis les parties amont sont à nouveau déposés et forment une colline. (figure 2.29). La portion aval de ce dépôt a une pente de 18 à 21° le sédiment est très grossier et il n'y a pas de surface d'écoulement. Comme la dune se développe, le phénomène continue et la dune s'élève. La pente de la partie amont est de 9 à 13°.

Ce phénomène peut être considéré comme intermédiaire entre le transport individuel et l'écoulement de boue. En général, modes de transport collectif et individuel alternent. Ce transport intermédiaire est particulier au mélange sable gravier et il apparaît que, plus l'étendue granulométrique est grande plus la dune est haute."

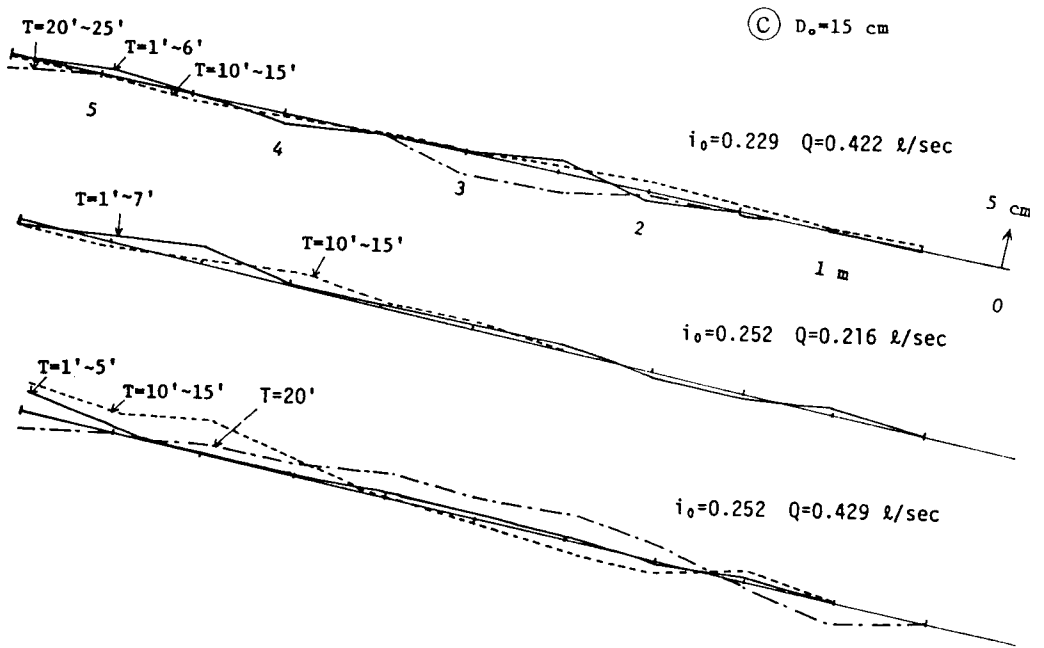


Figure 2-29 : Mouvement des dunes à forte pente (d'après MIZUYAMA 1977)

Cette description n'est pas sans rappeler celle de LISLE (1990) à propos du transport par nappe d'une granulométrie étendue. Il apparaît en effet que ce type de phénomène est directement lié à une granulométrie étendue. Il apparaît aussi que ce type de structure n'apparaît pas de façon systématique, ce qui en complique l'étude.

La figure précédente est très intéressante concernant les dimensions de ces dunes :

- La longueur est d'environ deux mètres,
- La hauteur entre le sommet des dépôts et le fond des affouillements est d'environ 6 cm.

Or le diamètre moyen des matériaux utilisés dans ces essais n'excède jamais 8 mm. Il est donc tout à fait concevable que ce modèle soit en similitude avec un torrent fictif mais plausible à l'échelle de $1/50^\circ$. Dans ce cas, ces dunes correspondent à des structures de 100 m de longueur, entraînant une variation du niveau du fond de 3 m! Elles deviennent alors le phénomène à considérer lors d'études de dimensionnement d'ouvrages.

Or le développement de ce type de structure a été constaté sur d'autres modèles réduits et aussi localement sur des torrents réels. Ces observations correspondent donc à un phénomène classique du transport solide à forte pente. Il sera réexaminé lors des études de morphologie à grande échelle sur modèle réduit.

2.7.8. Les marches d'escaliers

2.7.8.1. description

Par marches d'escalier on désigne ici une alternance de seuils et de mouilles dans le profil en long. STÜVE (1990) définit les mouilles comme des zones plates pour les faibles débits et les seuils par une augmentation de la granulométrie. WHITTAKER & JAEGGI (1982) abordent plutôt les séquences de marches d'escalier comme une variation de pente dans le profil en long liée à une évolution de la profondeur. Ils notent cependant la taille plus importante des matériaux au niveau des seuils mais aussi l'influence des débris végétaux dans ces phénomènes.

Une approche plus "visuelle" considère la forme de la surface de l'eau qui prend, à faible débit, un aspect de marches d'escalier, les replats alternant avec des cascades de faible hauteur. La figure suivante montre un profil en long assez détaillé pour faire apparaître ce type de phénomène.

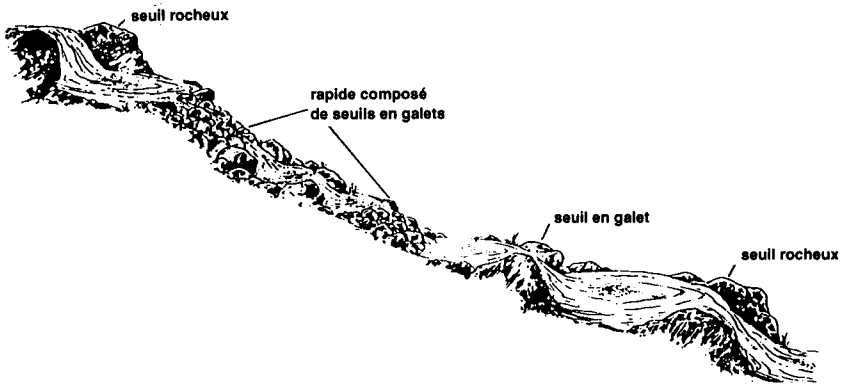


Figure 2-30 : Schématisation d'un système de marches d'escalier (d'après WHITTAKER & JAEGGI -1982)

Cependant WHITTAKER (1987) lui même reconnaît que la perception de marches d'escalier est subjective et dépend largement de la sensibilité du chercheur, certains la trouvant évidente alors qu'il n'en est rien pour d'autres.

D'autre part, la formation de telles structures semble très dépendante de l'hydraulicité et du transport solide et n'apparaît pas systématiquement. WHITTAKER, par exemple, considère que la fourniture excessive à long terme de sédiments est nuisible à la formation de marches d'escalier.

2.7.8.2. formation

La plupart des auteurs s'accordent à considérer que les marches d'escalier se forment pour des débits intermédiaires⁹. Se trouvant ensuite en déséquilibre avec les conditions "normales" d'écoulement, le lit apparaît extrêmement stable. Ainsi le passé du lit a une importance considérable dans l'observation actuelle.

Les explications de ce phénomène sont encore très partielles. La présence d'une granulométrie étendue semble autant indispensable qu'un écoulement capable de remanier les gros blocs. Pour le reste plusieurs théories s'affrontent.

2.7.8.2.1. Le renversement de la vitesse

KELLER (1978) par exemple a mesuré les vitesses à différents débits et montre que si la vitesse en basses eaux est plus réduite dans les mouilles que sur les seuils c'est le contraire pendant les crues. Ainsi les blocs importants ne peuvent s'arrêter que sur les seuils, conservant alors la morphologie à travers les crues. Il s'agit là d'une démarche qui concerne plutôt les alternances rapide - mouille sur les rivières ayant une pente de quelques pour-cents.

Cependant, d'autres auteurs ont mesuré une uniformisation des vitesses plutôt qu'un renversement. Enfin, l'effet transitoire que l'on rencontre en torrent semble incompatible avec cette théorie développée en rivière.

2.7.8.2.2. L'approche énergétique

La formation de marches d'escalier correspond bien aux théories de YANG selon lesquelles l'écoulement cherche à minimiser son énergie. Cet aspect a déjà été abordé précédemment.

2.7.8.2.3. Le transport en nappes

LISLE (1987) explique la formation des seuils et des amas de blocs en travers du bief par les particularités du charriage : le transport ne se produit pas suivant une couche où se mélangent les classes granulométriques mais suivant une superposition de nappes de rugosité et de granulométrie resserrées.

Ainsi, les éléments volumineux, qui voyagent en petits groupes durant les périodes de relativement faible transport solide, sont arrêtés par une augmentation locale de rugosité formant ainsi un seuil. Cette démarche présente l'avantage d'expliquer la physique du phénomène, bien que la connaissance du transport en nappe soit encore très sommaire.

2.7.8.2.4. Les antidunes

SHAW & KELLERHALS (1977) ont trouvé une bonne similitude entre les formes du lit sur le terrain et celles observées en laboratoire. Cependant la faible submersion relative dans le cas des torrents rend l'effet des blocs sur l'écoulement plus important que celui des ondulations de la surface comme dans le cas des antidunes. La principale difficulté

⁹ Il s'agit de débits assez importants pour déplacer les plus gros grains, mais assez faibles pour permettre l'arrêt d'un amas (ou l'arrêt de deux blocs qui s'entraident pour résister à l'écoulement). Généralement, c'est le cas des fins de crue ou des forts débits de fonte.

théorique est d'expliquer la formation de seuils fixes par des antidunes migrant vers l'amont.

WHITTAKER & JAEGGI (1982) ont effectué une étude systématique en laboratoire pour étudier ce phénomène. Ils ont utilisé un canal à recirculation mais sans apport extérieur de matériaux et à granulométrie étendue dans les conditions suivantes :

$$2 < d < 50 \text{ mm}$$

$$2.5 < I < 25 \%$$

Les essais portaient d'un lit plat dont les caractéristiques hydrauliques sont mesurées. Le débit était réduit lorsque le lit était stabilisé pour comparer l'apparence sous un faible écoulement avec les observations de terrain. Ils ont fait les observations suivantes :

- Pour les "faibles pentes" ($I < 7.5 \%$), des antidunes se formaient donnant à l'écoulement l'aspect de marches d'escalier pour les faibles débits. Les longueurs d'onde et les nombres de Froude correspondent alors à la zone de formation d'antidunes définies par KENNEDY (1963). Il n'y a pas d'évolution significative de la rugosité. Dans ce cas il n'y aurait pas de pavage au sens de l'augmentation de taille mais plutôt un réarrangement des grains.
- Pour les fortes pentes ($7.5 \% < I$), les gros éléments dominant largement la formation du lit en influençant l'écoulement. Ils bloquent la propagation des ondes formant ainsi des seuils. La rupture de certains entraîne une bouffée de matériaux transportés. Une telle structure a aussi l'allure de marches d'escalier. Elle est aussi largement irrégulière à cause de la localisation aléatoire des blocs influençant l'écoulement.

L'augmentation de la rugosité de forme est alors considérable. L'application du critère de stabilité de GESSLER (1965) montre que la stabilisation n'est possible que grâce à l'augmentation de rugosité du lit. Un pavage très grossier se développe alors.

La formation de marches d'escalier apparaît donc comme l'interaction du processus d'antidunes avec celui du pavage. La mesure de la concentration des éléments rugueux montre ainsi que la résistance à l'écoulement est maximum.

Ces essais sont évidemment intéressants. Cependant la largeur très réduite du canal et l'absence de matériaux transportés autres que ceux érodés laissent penser que les processus naturels sont plus complexes. De plus, les auteurs sont très discrets sur les conditions hydrauliques, en particulier sur la contrainte de cisaillement. WHITTAKER (1987) indique qu'elles correspondent à des crues relativement fréquentes.

ASHIDA, EGASHIRA & ANDO (1984) ont conduit un grand nombre d'essais avec une granulométrie étendue et ont observé les mêmes phénomènes dans les conditions suivantes :

- pente du lit : 5 %
- nombre de Froude : 1.36
- contrainte de cisaillement légèrement inférieure à la valeur critique des éléments les plus gros. Cette condition est présentée comme indispensable à la structure en marches d'escalier car nécessaire à la formation du pavage.

2.7.8.3. influence sur l'écoulement

WHITTAKER & JAEGGI (1982) se sont particulièrement attachés aux variations de rugosité lors de leur étude sur la formation de cette structure. Ils ont montré que la concentration en éléments rugueux est maximum, ce qui correspond bien aux théories énergétiques de YANG.

Dans le cas de marches d'escalier, le nombre de Froude oscille autour de l'unité détruisant la régularité de l'écoulement. Cette structure de l'écoulement est variable suivant les débits (STÜVE 1990) et est plus uniforme pour les hautes eaux.

EGASHIRA ET ASHIDA (1989) définissent une zone de séparation en aval des seuils dans laquelle se produit une dissipation importante d'énergie. La figure suivante montre le schéma qu'ils ont adopté.

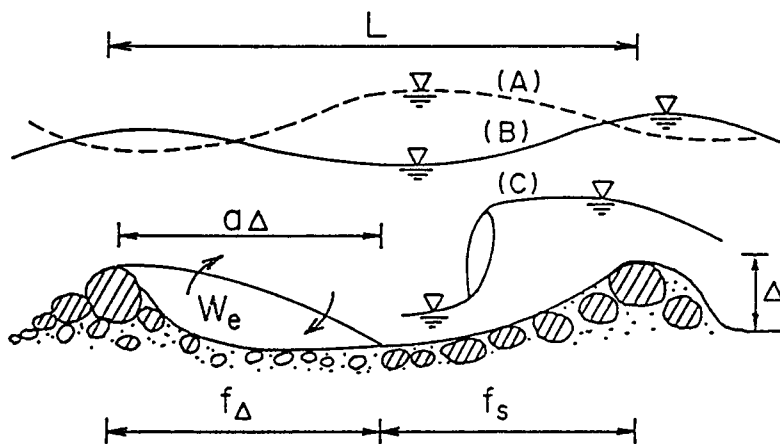


Figure 2-31 : Structure de l'écoulement dans le cas de marches d'escaliers (d'après EGASHIRA ET ASHIDA).

Les lettres A, B & C correspondent à des débits différents.

Dans la zone en aval des seuils, l'activité turbulente est considérable. La perte de charge totale est obtenue par l'addition de celle dans la zone de séparation avec celle se produisant au-dessus et enfin celle des éventuels ressauts hydrauliques :

- la perte dans la zone de séparation est exprimée par :

$$f_{\Delta} = 4KE_m \frac{\Delta}{h} \dots\dots\dots(2-78)$$

E_m et K sont des constantes numériques($E_m=0.08$ et $K=6$).

Δ est la hauteur de la vague, les autres paramètres étant obtenus à partir d'essais en canaux.

- le facteur de friction dans la région supérieure correspond à un profil logarithmique de vitesse et s'écrit :

$$f_s = \frac{8}{(6 + 2.5 \ln(\frac{h}{k_s}))^2} \dots\dots\dots(2-79)$$

- la perte par ressaut hydraulique est exprimée classiquement par :

$$\frac{8}{Fr^2} = \frac{\delta H}{L} \dots\dots\dots(2-80)$$

δH énergie perdue par le ressaut.

L longueur d'onde des marches d'escalier

Le facteur de friction est finalement la moyenne pondérée des coefficients précédents. Cette conception est proche de celle de NAKAGAWA et al. (1989) qui décrivent une structure de turbulence attachée aux gros obstacles.

Cette démarche, si elle n'est pas applicable directement, montre que les alternances seuil - mouille brisent l'écoulement en combinant l'effet de sillage et les ressauts hydrauliques. Il s'agit donc d'un élément diminuant la vigueur des écoulements et contribuant - par ce biais - à réduire le transport solide.

2.7.8.4. incidence sur le transport solide

L'effet des marches d'escalier sur le transport solide concerne autant le transit de matériaux apportés par l'amont que la stabilité du lit. Il apparaît que cette morphologie entraîne une variation spatiale comme temporelle du transport par charriage.

ERGENZINGER ET SCHMIDT (1990) ont mesuré sur le torrent du Lainbach, en haute Bavière, le déplacement de matériaux dotés d'émetteurs radio ou repérables par une couche de peinture. Ils obtiennent les résultats suivants concernant l'effet des marches d'escalier :

- La sédimentation temporaire est plus réduite sur les seuils que dans les mouilles,
- La distribution des distances de parcours à une loi de Poisson est troublée par la structure en marches d'escalier qui "impose" des zones d'arrêt du matériau.

WHITTAKER (1987) a conduit des essais en canaux en modélisant la structure en marches d'escalier par une succession de déversoirs en bois espacés régulièrement. Les essais étaient de deux types : l'affouillement en eau claire et le transport de matériaux en régime stable. Il a établi les formules suivantes (voir la figure pour les notations spécifiques à ce jeu de formules) :

$$S_0 = \frac{1.41 \sqrt{q - q_c} h^{0.48}}{d_{90}^{0.23}} \dots\dots\dots(2-81)$$

$$q_c = \frac{(0.047d(s-1))^{1.667}}{nJ^{1.167}} \quad (\text{avec } n = 0.0417d^{0.167}) \dots\dots\dots (2-82)$$

$$S = \frac{0.91(q - q_c)^{0.45} h^{0.59}}{d_{90}^{0.27}} \dots\dots\dots (2-83)$$

$$\frac{S_0}{I_2} = 0.34J^{0.7} \left(\frac{L}{d_{90}}\right)^{0.4} \dots\dots\dots (2-84)$$

q_{cr} est le débit critique pour lequel le matériau caractérisant le coefficient de rugosité de Manning commence à bouger.

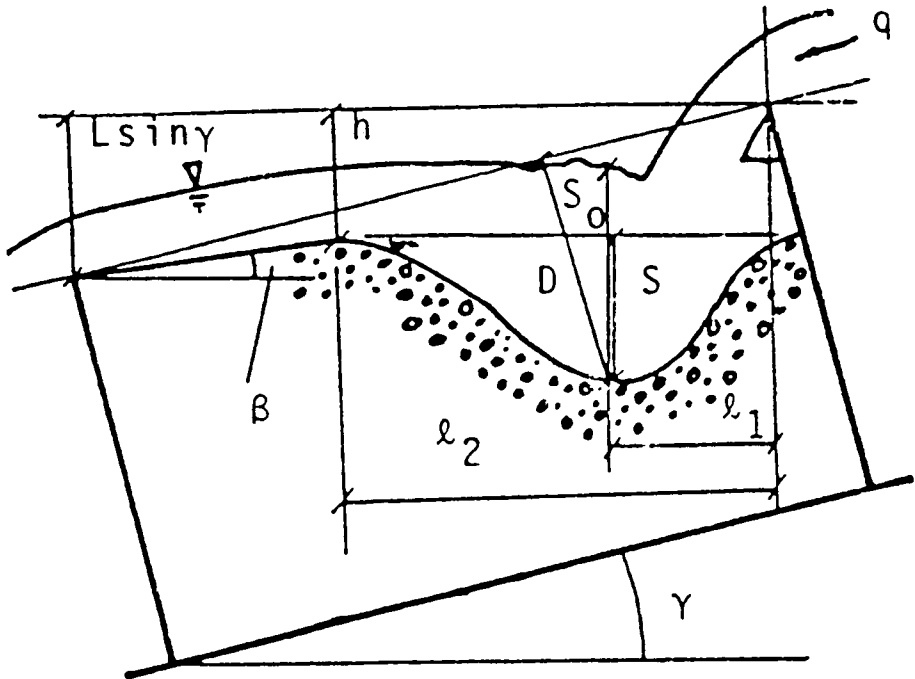


Figure 2-32 : Notations pour l'étude du transport solide dans un lit composé de seuil et de mouilles - d'après WHITTAKER (1987).

Cette approche montre qu'il y a une très forte interaction entre le transport solide et la morphologie fine du lit. Le débit solide peut alors être calculé à partir de l'équation de SMART & JAEggi appliquée à la fosse (on considère l'angle β pour valeur de la pente).

La variabilité du transport solide est ensuite abordée. Malgré des débits liquide et solide entrants constants, les variations de débit solide en aval du modèle sont importantes. Ainsi l'hypothèse de régime établi n'est pas satisfaisante, mais le manque de données sur ce problème empêche une approche quantitative.

WHITTAKER admet que son modèle a une morphologie très grossière mais que le relevé sur le terrain est encore très subjectif. Des paramètres essentiels de la morphologie (en

particulier la profondeur de la mouille) évoluent au cours du temps et dépendent des dernières crues mais aussi de la durée qui s'est écoulée depuis.

LISLE & HILTON (1992) ont abordé l'étude des variations de matériaux dans les mouilles. Ils ont défini, à partir de mesures de terrain un coefficient correspondant à la quantité de matériaux retenus :

$$V^* = \frac{V_f}{V_f + V_r} \dots\dots\dots(2-85)$$

- avec V^* fraction de mouille occupée par le sédiment fin
- V_f volume de matériau fin dans une mouille
- V_r volume de la mouille occupé par l'eau.

Ils ont ensuite considéré la fourniture de matériaux (valeur moyenne sur l'année) au torrent en rapport avec sa capacité de transport. Ils ont obtenu une corrélation positive avec la quantité de matériaux fournie lorsque le transport solide est important et une corrélation négative avec la pente, en particulier lorsque la fourniture en matériaux est faible.

Cette approche confirme les observations de terrains qui montrent que les mouilles ont un rôle régulateur du transport solide.

2.7.9. Pavage

Le pavage désigne les caractéristiques particulières de la couche supérieure du lit. L'exposition permanente de celle ci à l'écoulement la rend plus résistante à l'érosion. Elle se distingue donc par une granulométrie et une imbrication des éléments particulières. Il est cependant difficile de donner une définition plus précise et le pavage est généralement perçu comme l'explication de l'écart entre formules et mesures de terrain.

2.7.9.1. différents types de pavage

Plusieurs expressions correspondent à ce phénomène. Si le terme de pavage est le plus utilisé en France, on parle aussi de carapace ou d'armure. Certains (MALAVOY 1992...) ont essayé de distinguer *pavage* et *armure* en fonction des phénomènes les engendrant. Cependant, Il s'agit d'une expérience périlleuse, la plupart des auteurs ne distinguant pas les deux termes, alors que ceux qui font une différence, le font indépendamment des autres chercheurs : il y a alors incompatibilité totale des terminologies. Dans la suite, les deux termes seront utilisés indifféremment, l'étude bibliographique montrant qu'il s'agit de phénomènes trop peu connus et trop variés pour pouvoir opérer une classification significative.

SIMON (1986) distingue trois types de pavage :

- Dans le cas d'une pénurie en matériaux, l'écoulement va solliciter le lit et mettre à jour des éléments trop grossiers pour être facilement transportés. Elle qualifie ce phénomène "**d'autopavage**". Les approches de ce type d'évolution sont détaillées par la suite. La figure suivante montre cette évolution.

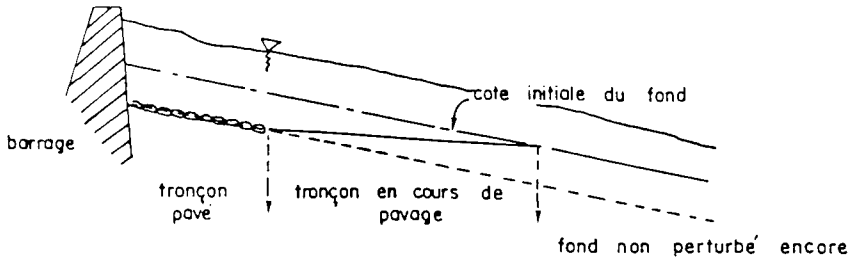


Figure 2-33 : évolution du lit dans le cas d'une pénurie en matériaux.

- Un autre processus de pavage peut - au contraire - être lié à une brutale surcharge en matériaux. SIMON désigne ce phénomène sous le nom de "revêtement externe". Il correspond à un tri granulométrique se produisant à la suite d'une diminution des contraintes hydrauliques liées - par exemple - à une diminution de pente. A granulométrie égale, un tel dépôt est nettement moins résistant que la structure d'autopavage.
Il convient d'ajouter à cette approche un élément fréquent pour les rivières torrentielles : le pavage au niveau du confluent avec un torrent. On se trouve alors avec un "revêtement externe". Cependant, la taille des éléments apportés est souvent tellement importante qu'une telle structure est très stable.
- Le troisième type de pavage prend le nom "d'armure mobile". Il correspond à une couche supérieure constituée d'éléments plus grossiers mais déplacés par les conditions ordinaires de l'écoulement. Une granulométrie étendue et des éléments grossiers semblent permettre ce type de pavage.

En fait, le processus le plus couramment étudié est celui d'autopavage. En effet, l'armure mobile semble un phénomène secondaire du transport solide en rivière alors que le revêtement externe n'a qu'un rôle accessoire puisqu'il est recouvert à moyen terme par d'autres dépôts.

Au contraire, l'autopavage se produit couramment (un déséquilibre en matériaux est une étape fréquente de la vie d'un cours d'eau) et prend un rôle prépondérant dans le comportement du lit puisque c'est généralement le seul phénomène qui limite l'érosion. Il est alors impossible de ne pas le considérer!

SUZUKI & KATO (1989) à partir d'une étude bibliographique opèrent une distinction basée sur la mobilité de la couche pavée. Ils proposent la classification suivante :

pavage	débit solide	mouvement des particules grossières	direction du tri	référence bibliographique
statique	non équilibré	non	horizontal	GESSLER
semi-statique	équilibré	non	vertical	SUZUKI & MICHIEU
mobile	équilibré	oui	vertical	KELLERHALS & BRAY

Il y aurait alors une possibilité d'une armure mobile avec un tri granulométrique vertical dans un équilibre dynamique avec le transport solide. Le débit solide non équilibré correspond à un transport solide inférieur à la saturation.

KUHNLE & SOUTHARD (1988) et IKEDA & ISEYA (1988) ont étudié expérimentalement l'armure mobile et ont mis en évidence des fluctuations du transport solide en fonction du temps.

PIANESE & ROSSI (1989) considérant les rivières du sud de l'Italie dont la pente passe brutalement de quelques % à quelques ‰ proposent un autre classement : Ils distinguent l'**armurage** créé lors d'une érosion progressive suite à une pénurie de matériaux provenant de l'amont, du **dallage** qui correspond à une exposition préférentielle des gros éléments. Le premier est un tri granulométrique longitudinal alors que le second est un tri granulométrique vertical beaucoup plus rapide. Cependant, ils regroupent les deux phénomènes sous le terme de pavage. Ils distinguent ces deux phénomènes macroscopiques du **masquage** qui est un processus microscopique engendré par chaque particule.

Un autre point important concerne l'étendue granulométrique du matériau : il ne peut y avoir de pavage si la granulométrie n'est pas suffisamment allongée. Ainsi, SIMON (1986) cite LITTLE & MAYER (1976) pour qui la déviation géométrique doit être supérieure à 1.5. Pour d'autres (GESSLER, IRVINE & SUTHERLAND, ou encore RAKOCZI) il faut que $\frac{d_{95}}{d_5} > 4$ ou 5 ou encore $\frac{d_{90}}{d_{50}} > 2$ à 2.5. Ces conditions sont presque toujours remplies dans le cas des torrents où l'on a souvent, pour la granulométrie de masse, $\frac{d_{90}}{d_{30}} \approx 10$.

2.7.9.2. déficit de l'alimentation en matériaux

C'est le cas classique à l'aval des grands barrages. La coupure de l'alimentation en matériaux détruit l'équilibre entre le lit et l'écoulement entraînant une érosion avec tri granulométrique : les plus gros éléments ne pouvant être déplacés par les débits ordinaires, restent en place, se réajustent pour mieux résister à l'écoulement et piègent les matériaux assez fins pour se glisser dans les interstices. Seules les crues de plus en plus exceptionnelles peuvent remanier ce pavage. Ce processus s'accompagne d'un enfoncement vertical, d'un changement temporaire de la pente et progresse lentement vers l'aval. La figure suivante montre ce schéma.

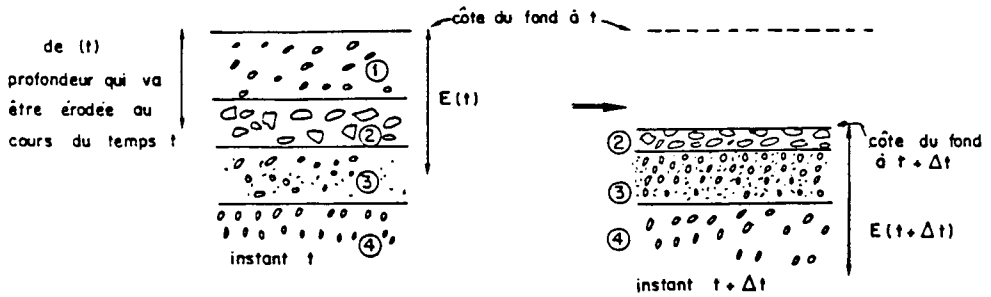


Figure 2-34 : Evolution du pavage dans le cas d'une pénurie en matériaux (d'après SIMON 1986).

KARIM & KENNEDY (1986) ont développé pour les grandes rivières américaines un modèle numérique très complet : IALLUVIAL. Il est cité ici car très représentatif des travaux réalisés dans ce domaine. Un modèle analytique plus léger permet d'obtenir de bons résultats en conservant des hypothèses similaires :

- le degré de pavage est défini par la proportion de la surface du lit recouverte de matériaux non transportables,
- le degré de pavage varie linéairement avec la profondeur érodée,
- l'épaisseur de la couche mobile est la moitié de la hauteur des dunes et décroît linéairement avec le pavage,
- la hauteur des dunes est considérée comme égale à $0.3 H$ conformément à ALLEN (1978),
- le transport solide évolue en fonction de la granulométrie de la couche supérieure,
- l'évolution de l'écoulement en fonction de l'érosion et de la granulométrie du lit n'est pas prise en compte.

2.7.9.3. effet des apports amont de matériaux

L'influence des conditions amont a été étudiée par SCHILLER & RONEY (1984) qui ont réalisé 6 expériences avec des fournitures de sédiments variables, une pente de 0.5 %, un écoulement stationnaire, une granulométrie peu étendue, des sédiments de moins de 2 mm de diamètre et une recirculation des matériaux. Ils obtiennent les résultats suivants :

- l'armure est plus grossière avec alimentation amont que sans mais le diamètre caractéristique de la surface diminue avec l'augmentation de celui injecté,
- l'érosion est plus importante avec l'injection d'éléments fins qu'avec des éléments grossiers,
- des sillons longitudinaux se creusent, transportant l'essentiel des matériaux.

Il apparaît donc des phénomènes en contradiction avec les connaissances générales sur le débit solide. Ainsi, Simon (1986) à partir d'une analyse bibliographique n'hésite pas à affirmer :

" Il est par exemple évident qu'un barrage ne relâchant que de l'eau parfaitement claire n'exercera pas du tout le même impact qu'un barrage

laissant passer les particules les plus fines : dans le second cas, l'érosion risque d'être bien plus prononcée."

Or, dans la nature, les écoulements " un peu forts" sont généralement accompagnés d'un transport d'éléments fins.

Cependant, vu la complexité de ce phénomène de pavage, l'ensemble des chercheurs étudie l'effet d'un écoulement d'eau claire, l'ajout de matériaux en amont étant considéré comme une seconde étape nécessitant une bonne compréhension des phénomènes élémentaires.

SUZUKI & KATO (1989) ont réalisé des expériences en canal avec un mélange de sable et de graviers pour des pentes de l'ordre de 1 à 3 %, dans un canal de 40 cm de large. Ils ajustaient le débit solide amont de façon à avoir des conditions identiques au recyclage (pente constante, débit et granulométrie solide identiques à chaque extrémité du chenal).

Ils ont montré que le pavage mobile ne peut se produire que pour des valeurs de la contrainte de cisaillement adimensionnelle correspondant au d_{50} d'environ 0.06 à 0.1. Toutes les particules sont déplacées mais le lit est resté globalement plat.

Ils obtiennent les résultats suivants :

- l'épaisseur de la couche de transport (et de pavage pour une armure mobile) est de l'ordre de d_{90} pour un lit plat et l'épaisseur des dunes quand elles existent.
- le pavage mobile est rapidement créé au contraire du pavage fixe car le tri granulométrique se produit verticalement¹⁰ et non longitudinalement. Les volumes à trier sont alors déplacés sur une distance beaucoup plus courte et, dans une section, la composition granulométrique n'est globalement pas modifiée dans le cas du tri vertical,
- les dunes ne peuvent pas se former pour une valeur de la submersion relative (R/d) inférieure à 10 et aucune forme du lit significative n'est apparue durant leurs essais,
- la couche supérieure est d'autant plus grossière que la contrainte de cisaillement est proche de la valeur critique.

Le pavage agit dans ce cas comme une régulation de l'échange entre les couches sous-jacentes et la couche de transport : Les particules les plus fines étant plus facilement transportées, il est nécessaire de les camoufler sous les éléments plus grossiers pour assurer l'égalité entre la granulométrie transportée et celle des couches profondes. La différence de vitesse de déplacement des particules en fonction de leur taille explique alors l'écart entre la granulométrie transportée et celle de la couche de transport formant le pavage mobile. Cette différence diminuant avec l'augmentation de contrainte de cisaillement, les couches pavées disparaissent lors des écoulements exceptionnels.

¹⁰ Le pavage vertical correspond à un découvrément des grains par l'écoulement. C'est un premier tri granulométrique qui prépare le pavage longitudinal, qui conduit à l'obtention d'une surface beaucoup plus résistante.

2.7.9.4. stabilité de l'armure

GESSLER (1965) a approché le pavage par des théories probabilistes du type de celle d'EINSTEIN. Cela présente l'avantage d'expliquer que toutes les classes granulométriques se trouvent dans la couche de surface et de tenir compte du caractère aléatoire de la turbulence.

Il considère que la distribution de la contrainte de cisaillement est représentée par une gaussienne et que la courbe de SHIELDS correspond à une probabilité de rester immobile "q" de 0.5. Il exprime la probabilité pour un grain de rester immobile par :

$$q = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\tau_c - 1}{\Sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \dots\dots\dots (2-86)$$

Σ et σ sont respectivement la moyenne et l'écart type de la loi normale de distribution des contraintes.

GESSLER a cherché à vérifier ses hypothèses à partir d'études expérimentales. Pour cela il a utilisé un canal de 40 mètres de long avec des pentes inférieures à 3 %. Durant ses expériences, il distingue deux phases :

- formation de rides puis d'un pavage (les gros éléments se trouvant au pied des rides)¹¹,
- diminution du débit solide, et formation de bandes longitudinales suite à l'apparition de courants secondaires. Il remarque que le nombre de bandes est fonction du tirant d'eau. Le matériau érodible finit par manquer, les bandes par disparaître et il reste finalement un pavage uniforme.

A partir de là, il a pu calculer la valeur de σ donnant une bonne approximation. Il propose $\sigma = 0.57$ ce qui est proche de la valeur de 0.5 proposée par EINSTEIN.

GESSLER définit alors un coefficient moyen pour la stabilité de la couche pavée par :

$$\bar{q} = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} q(k) p_a(k) dk \dots\dots\dots (2-87)$$

avec $p_a(k)$ fonction de densité de la classe k.
la stabilité étant assurée pour $\bar{q} \approx 0.5$ (dans le cas d'études sommaires, il propose la valeur 0.65).

Cette approche présente trois défauts majeurs : elle néglige l'inertie des matériaux, l'effet de masquage/dissimulation, l'imbrication et la cohésion qui sont considérables pour une armure fixe.

RAUDKIVI & ETTEMA (1982) ont adopté une approche microscopique de la stabilité d'un lit pavé en considérant des éléments isolés de diamètre d_2 sur un lit de diamètre d_1 . Ils ont étudié l'évolution de la contrainte de cisaillement adimensionnelle critique en fonction de la protubérance P (la figure suivante montre les conditions des essais, et la relation entre contrainte de cisaillement adimensionnelle critique et protubérance).

¹¹ La présence de rides montre que la similitude du modèle réduit n'est plus respectée. Ces résultats doivent donc être considérés avec la plus grande prudence.

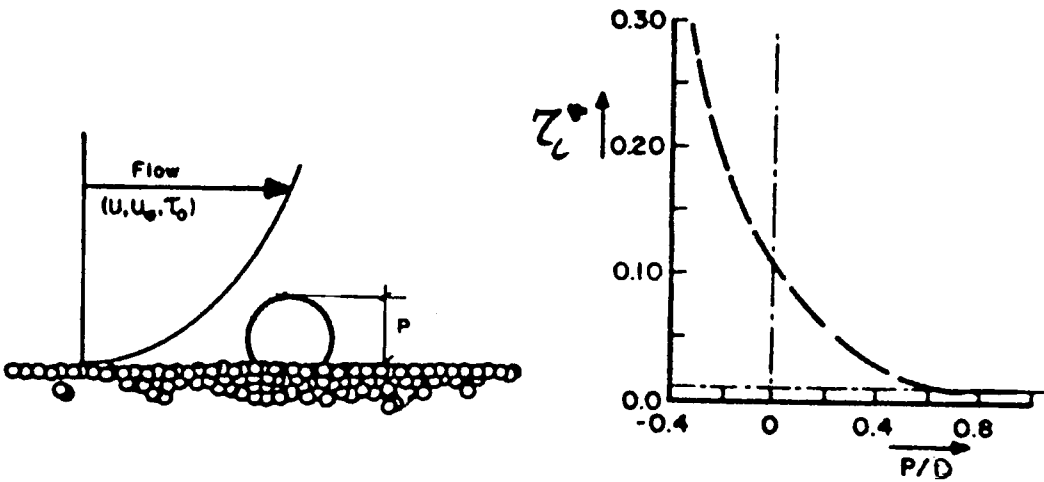


Figure 2-35 : définition des conditions d'essai de RAUDKIVI & ETTEMA.
Influence de la protubérance des particules sur leur mobilité.

Il apparaît nettement alors que la protubérance est de loin le principal paramètre concernant le mouvement d'une particule grossière. Il n'y a alors rien de surprenant à ce que, dans certains cas, les particules grossières soient nettement plus mobiles que les plus fines.

Cependant, les turbulences en aval d'une grosse particule engendrent une érosion locale lui permettant de se dissimuler (en général les grosses particules sont enchâssées de 50 à 70 %).

RAUDKIVI & ETTEMA définissent 4 comportements différents en fonction des paramètres suivants :

- U_* vitesse de frottement du fond
- U_{*1} vitesse de frottement de d_1 .

Les résultats sont tracés à la Figure suivante. la signification des zones est la suivante :

1. Pas de mouvement.
2. Particule d_1 en mouvement éventuel en fonction de leur protubérance. Dans la zone 2, le lit de particules d_2 est immobile alors qu'il y a mouvement en zone 2 bis.
3. enchâssement des particules d_1 dans le lit.
4. érosion généralisée.

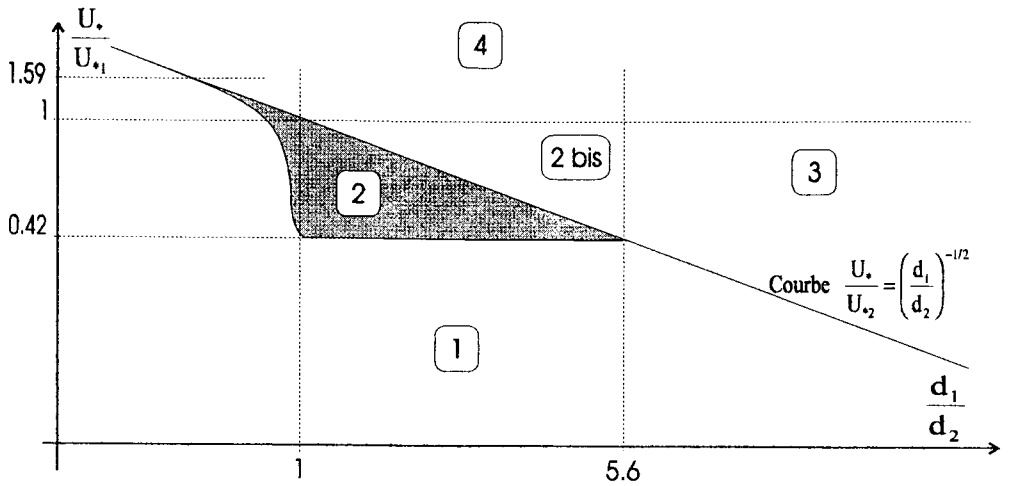


Figure 2-36 : zones de mobilité des particules dans le cas d'une granulométrie bimodale (d'après RAUDKIVI & ETTEMA - 1982).

Ils en concluent que pour une armure stable il faut :

$$\frac{d_1}{d_2} > 100 \tau_{*c_2} \dots \dots \dots (2-88)$$

ce qui correspond à un déplacement possible d'une taille de particules sans nuire à la stabilité de celles qui forment l'essentiel du lit. Ces valeurs ont été confirmées par des expériences en canal. Cependant la réduction d'une granulométrie étendue à une distribution bimodale est sans doute une hypothèse très forte hypothéquant fortement les résultats obtenus. Le principal intérêt de cette étude est de montrer le rôle de l'exposition des particules dans l'écoulement, la contrainte critique de début de mouvement variant dans un rapport de 1 à 100 en fonction de la protubérance du grain.

2.7.9.5. dynamique du pavage

C'est un point non étudié de façon systématique. La définition d'un lit pavé comme les phénomènes présidant à sa formation n'étant pas connus, il n'est pas surprenant que la vitesse de formation d'un lit ainsi que la façon dont s'enchaînent les différentes étapes ne soient pas abordées.

Dans le cas le plus étudié, lors d'une coupure de l'alimentation en matériaux, dans une rivière à faible pente, l'approche classique (Karim & Kennedy) considère qu'il n'y a pas de changement de la pente du lit mais seulement un enfoncement du lit de façon à faire apparaître assez de matériaux grossiers pour résister à l'écoulement. Cette approche est parfaitement cohérente avec le concept de couche d'échange utilisé dans les modèles numériques (Rahuel par ex). Le profil en long aurait alors la forme exposée à la figure 2-33.

La zone à plus faible pente permettrait de raccorder les deux sections du lit. Il ne s'agit que d'une zone de transition en déséquilibre avec l'écoulement. Ainsi, pour une section donnée, le pavage se forme de la façon suivante :

initialement, le fond est en équilibre avec un écoulement suffisamment chargé en matériaux par le bief amont.

lorsque la production amont diminue par réduction de la surface productrice, l'équilibre est rompu, l'érosion sélective commence. Il se produit alors un faible basculement de pente qui contribue temporairement à réduire la vitesse d'érosion.

La concentration en éléments transportés étant de plus en plus réduite, l'érosion a tendance à s'accélérer, mais le lit devient de plus en plus grossier. La pente retrouve lentement la valeur initiale au fur et à mesure que le débit solide fourni par la section diminue. Cette étape se produit sans doute par palier, les restructurations de la surface étant de plus en plus partielles.

Enfin, un nouvel équilibre est atteint, sans transport solide ni érosion.

2.7.9.6. Conclusion

La taille et l'imbrication particulière des matériaux en contact avec l'écoulement entraînent une résistance des grains à l'arrachement bien supérieure à celle mesurée dans un lit remanié. Cette caractéristique est généralement appelée **pavage**.

On distingue quatre types de pavage, suivant leur formation, certains étant plus résistants à l'érosion :

- le **pavage mobile** constitué par des grains grossiers transportés mais peu mobiles et qui protègent les éléments plus fins,
- le **pavage semi-statique** correspond à un transport solide rare et est issu d'un tri granulométrique vertical,
- le **pavage statique** se forme à l'issue d'un tri granulométrique longitudinal et n'est détruit que dans le cas de crues exceptionnelles. Il est souvent associé à des marches d'escalier.
- le **pavage issu d'apports extérieurs** au torrent. C'est le cas par exemple dans les zones d'éboulement. Il s'agit d'un phénomène très différent des précédents et qui n'est pas considéré dans ce travail.

Pour un pavage statique ou issu d'apport extérieurs, le lit est composé d'une succession de seuils et de mouilles. On parle alors de **marches d'escalier**. La formation de ces structures se produit pour des écoulements forts mais non exceptionnels, mais elle reste mal établie. En effet, il apparaît nettement qu'il s'agit d'un phénomène intrinsèque au charriage torrentiel, mais l'étude de la formation de telles irrégularités est difficile.

WHITTAKER & JAEGGI (1982) ont émis l'hypothèse que l'interaction entre des amas de blocs temporairement arrêtés et la propagation d'antidunes est prépondérante. Cependant, les mécanismes de bases de cette formation sont encore obscurs.

2.7.10. Synthèse

La **dynamique fluviale** est extrêmement complexe. La première difficulté provient de la variation des conditions hydrauliques et sédimentologiques (solllicitations hydrologiques).

La démarche classique considère qu'un "débit dominant" modèle le lit (son temps de retour est de l'ordre de quelques années). Ce problème étant résolu, il est possible de

considérer que, pour un débit constant, le cours d'eau ajuste son lit à la recherche de l'équilibre.

Deux alternatives s'offrent alors au chercheur :

- **L'étude mécanique** des phénomènes (basée sur les notions de vitesse d'écoulement, de contrainte de cisaillement, de seuil de début de mouvement, etc...) est très prometteuse car elle permet non seulement de prévoir mais aussi d'expliquer les évolutions. Cependant, même en hydraulique fluviale, la complexité des phénomènes et le peu de connaissance que l'on en a, limitent ce type d'approche à des cas très simples : écoulement rectiligne, avec une submersion relative forte, une pente très réduite et une granulométrie resserrée.
- **La minimisation ou la maximisation d'une fonction par le cours d'eau** est utilisée pour modéliser la recherche d'un équilibre. Il est alors possible de prévoir les tendances des évolutions morphologiques. De multiples fonctions ont été proposées, généralement équivalentes dans la zone de variation des paramètres correspondant à une rivière.

Comme le montrent les travaux de YANG, il est alors possible de justifier l'ensemble des particularités morphologiques d'une rivière. Cependant, un tel travail nécessite une excellente maîtrise du paradoxe. D'autre part, il montre une tendance, sans parvenir à une quantification du phénomène.

Dans le cas des torrents, l'approche est plus complexe. Le schéma ci dessous montre comment interagissent les différents phénomènes :

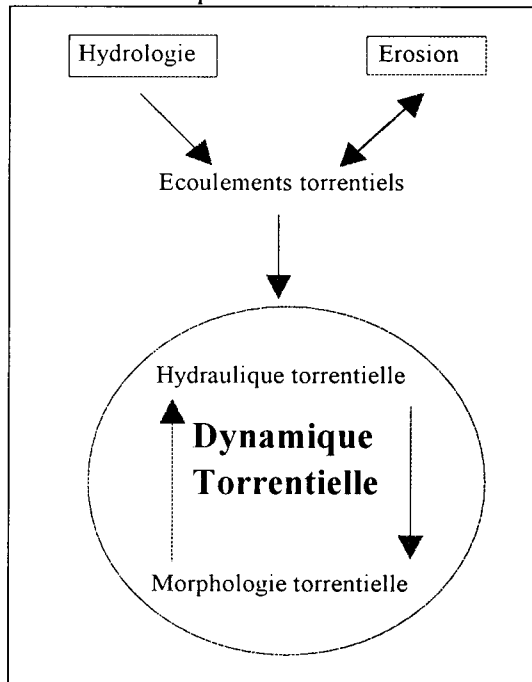


Figure 2-37 : Schéma des phénomènes torrentiels.

La première difficulté pour comprendre la dynamique torrentielle provient des variations temporelles des écoulements torrentiels. En effet, les modifications du débit liquide (hydrologie) et surtout de la fourniture en matériaux sont beaucoup plus importantes et rapides en torrent que pour les cours d'eau de faible pente (le pas de temps d'une crue torrentielle est de l'ordre de quelques minutes, alors que pour une rivière, il s'agit d'heures). Cependant, la prise en considération des fluctuations des contraintes extérieures au bief est beaucoup trop complexe pour être réalisée dans le cadre des connaissances actuelles.

D'autre part, les objectifs des études de morphologie torrentielle sont nettement différents de ceux de l'hydraulique fluviale : il ne s'agit plus de déterminer les proportions de la section mouillée ni de déterminer la longueur d'onde de méandres mais plutôt d'étudier la nature de la couche superficielle du lit. En effet, celle-ci est révélatrice des autres paramètres du lit - y compris la pente puisque les contraintes de cisaillement augmentent avec la pente. Si le lit est à l'équilibre, cela indique qu'il doit être plus résistant dans les zones de forte pente. La couche de surface est alors différente.

Le tableau suivant montre les imbrications d'échelles des principales structures que l'on observe dans un torrent :

structure morphologique	échelle	phénomène intervenant
profil en long	ensemble du torrent	dynamique d'ensemble du bassin versant
dune à forte pente	zone de dépôt	caractéristique du charriage torrentiel en granulométrie étendue
pavage du lit	bief localisé	fourniture de sédiments par le lit
marches d'escalier	élément de base du pavage	caractéristique locale de l'écoulement

Ainsi, il est difficile d'individualiser chaque élément morphologique du lit.

L'étude de la morphologie torrentielle est donc axée sur le pavage du lit et son influence sur le transport solide et la stabilité du lit. En effet, il est nécessaire de connaître ces structures élémentaires si l'on veut pouvoir comprendre avec finesse la formation d'une morphologie torrentielle. Il apparaît que ces structures morphologiques se forment lors des crues assez fortes pour déplacer les plus gros éléments sur lit, mais assez réduites pour que l'écoulement soit peu chargé en matériau.

Les structures en marches d'escalier sont encore mal connues. D'autre part, d'autres structures morphologiques, telles que les "dunes à forte pente" ont un rôle important dans le comportement du lit. Par leur ampleur, elles semblent être le phénomène le plus important à considérer lors du dimensionnement d'ouvrage de protection. D'après MIZUYAMA (1977), elles introduisent localement une diminution de pente qui correspond à un abaissement du lit en amont (et donc une érosion intense) et à un dépôt en aval essentiellement constitué de matériaux grossiers.

Enfin, l'historique de la correction torrentielle montre combien le profil en long d'un torrent est un élément capital pour en comprendre le fonctionnement. Une décroissance régulière de la pente a pu être mise en évidence lorsqu'il n'y a pas d'influences extérieures. Elle est justifiée par l'usure des matériaux et par un tri sélectif des grains. L'importance relative de ces deux phénomènes dépend essentiellement de la nature géologique des sédiments (PARKER - 1990). D'autre part, HAMPEL (1977) a établi des relations entre la concentration en matériaux, le diamètre des grains et la pente.

La diversité des échelles des structures morphologiques montre qu'il est nécessaire, afin d'éclaircir les différentes typologies, de procéder à des essais correspondant à ces imbrications d'échelle, les observations de terrain, par leur complexité et la difficulté de prendre du recul, rendant une telle distinction très difficile.

2.8. Liste des figures

Figure 2-1 : Les phénomènes torrentiels et les disciplines s'y rattachant (d'après Meunier 1991).....	51
Figure 2-2 : Section longitudinale d'une lave torrentielle (d'après Meunier 1991).....	52
Figure 2-3 : Profil transversal d'un lit de torrent à lave (d'après Lefebvre - 1979).....	53
Figure 2-4 : Schéma d'un lit soumis à un transport solide par charriage.....	54
Figure 2-5 : Calcul des diamètres maxi des grains en suspension dans le cas d'une hauteur d'eau de 1 m pour des pentes et avec des formules différentes.....	57
Figure 2-6 : définition de la concentration de rugosité (d'après Cao 1985).....	64
Figure 2-7 : Mesure de distribution de vitesse pour un lit de graviers naturels (d'après Mizuyama 1977).....	66
Figure 2-8 : effet du nombre de Froude sur le coefficient de traînée d'une demie sphère (d'après Flammer & al - 1970).....	68
Figure 2-9 : Diagramme de Shields : contrainte de cisaillement adimensionnelle en fonction du nombre de Reynolds du grain (d'après Vanoni-1984).....	72
Figure 2-10 : comparaison des expressions (2-29) (2-30) et (2-31).....	75
Figure 2-11 : Contrainte de cisaillement adimensionnelle t^* en fonction de la profondeur relative h/d_{50} et de la probabilité de mouvement du paramètre. (d'après Graf et Suszka 1987).....	77
Figure 2-12 : Comparaison entre les valeurs calculées et les mesures de débit solide sur 4 rivières (d'après Yang 1989).....	82
Figure 2-13 : Comparaison entre les mesures de débit solide en canal et les valeurs calculées (d'après Yang 1989).....	83
Figure 2-14 : Situation des paramètres t/t_c & R/d_m lors des essais ayant permis le développement des formules (d'après Smart & Jaeggi - 1983).....	85
Figure 2-15 : rapport du débit unitaire de charriage sur le débit liquide unitaire en fonction de la densité du fluide (d'après Rickenmann 1989).....	88
Figure 2-16 : Modélisation d'hydrogramme (d'après Graf & Suszka 1985).....	89
Figure 2-17 : contrainte de cisaillement adimensionnelle en fonction du débit solide adimensionnel - comparaison de différentes formules (d'après Larsen 1990).....	91
Figure 2-18 : Confrontation de différents coefficients de masquage (d'après Simon 1986).....	95
Figure 2-19 : changement de comportement lorsque la concentration en matériaux solides atteint 3%. L'ordonnée correspond à l'ajout relatif de perte de charge due aux particules.....	99

Figure 2-20 : Diminution de l'influence de la concentration avec la vitesse de l'écoulement	99
Figure 2-21 : diminution des pertes de charges par ajout de particules fines	99
Figure 2-23 : Relation entre la pente des berges et le rapport largeur/profondeur de la section mouillée (d'après Yang 1989)	111
Figure 2-23 : Domaines de classification des dessins de chenaux (d'après Mizuyama 1977)	116
Figure 2-25 : dessin des chenaux pour une granulométrie étendue (d'après Mizuyama 1977)	117
Figure 2-26 : différentes configurations du lit (d'après Simons & Richardson - 1966).....	118
Figure 2-27 : évolution de la contrainte de cisaillement au niveau du lit en fonction de la vitesse et des formes du lit (d'après Englund & Hansen - 1967).....	119
Figure 2-28 : Classification des formes de lits (d'après Mizuyama 1977).....	120
Figure 2-29 : Mouvement des dunes à forte pente (d'après Mizuyama 1977)	122
Figure 2-30 : Schématisation d'un système de marches d'escalier (d'après Whittaker & Jaeggi -1982)	123
Figure 2-31 : Structure de l'écoulement dans le cas de marches d'escaliers (d'après Egashira et Ashida)	126
Figure 2-32 : Notations pour l'étude du transport solide dans un lit composé de seuil et de mouilles - d'après Whittaker (1987).	128
Figure 2-33 : évolution du lit dans le cas d'une pénurie en matériaux.	130
Figure 2-34 : Evolution du pavage dans le cas d'une pénurie en matériaux (d'après Simon 1986).....	132
Figure 2-35 : définition des conditions d'essai de Raudkivi & Ettema. Influence de la protubérance des particules sur leur mobilité.	135
Figure 2-36 : zones de mobilité des particules dans le cas d'une granulométrie bimodale (d'après Raudkivi & Ettema - 1982).	136
Figure 2-37 : Schéma des phénomènes torrentiels.	138

1 - Introduction - Généralités

2 - Analyse bibliographique

3 - Méthodes de mesure

Sommaire

3.1. Introduction	146
3.2. Mesure de granulométrie	146
3.2.1. Le concept de granulométrie	146
3.2.2. Objectif des mesures	149
3.2.3. Les différentes méthodes employées	150
3.2.3.1. Mesure par tamis	150
3.2.3.1.1. Mise en oeuvre.....	150
3.2.3.1.2. Détermination d'une granulométrie de surface.....	151
3.2.3.2. Mesure par photo.....	152
3.2.3.3. Mesure par échantillonnage linéique.....	157
3.2.4. Incertitudes de mesure.....	158
3.2.4.1. Méthode employée	158
3.2.4.2. Incertitude de la mesure de la longueur en fonction de la méthode employée.....	158
3.2.4.2.1. Granulomètre	159
3.2.4.2.2. Mètre	160
3.2.4.2.3. Compas.....	160
3.2.4.2.4. Longueur de traversée	161
3.2.4.2.5. Comparaison des différentes mesures.....	162
3.2.4.2.6. Distribution des erreurs.....	162
3.2.4.3. Effet d'échantillonnage	163
3.2.4.3.1. Echantillonnage dans une même population	163
3.2.4.3.1.1. Taille de l'échantillon	164
3.2.4.3.1.2. Intervalle de prélèvement	166
3.2.4.3.2. Variabilité à l'intérieur d'une zone donnée	168
3.2.4.4. Cas des longueurs de traversées sur photo	169
3.2.4.5. Conclusion.....	170
3.3. Mesures sur modèle réduit.....	172
3.3.1. Similitude des mesures sur modèle réduit.....	172
3.3.2. Mesure des granulométries.....	174
3.3.2.1. Granulométrie de base	174
3.3.2.2. Granulométrie de surface mesurée directement	176
3.3.2.3. Granulométrie transportée.....	177
3.3.3. Obtention de la granulométrie durant l'écoulement en utilisant le concept de couche active.....	178
3.3.3.1. Objectif	178
3.3.3.2. Théorie de la couche active.....	178
3.3.3.3. Paramètre explicatif des variations de la couche active	180
3.3.3.4. Méthode de calcul de la granulométrie de base	182
3.3.3.5. Méthode de calcul de l'évolution granulométrique de la surface du lit.....	184
3.3.4. Mesure de la pente du lit.....	185
3.3.5. Mesure des conditions hydrauliques.....	186

3.3.5.1. Débit	187
3.3.5.2. Vitesse	187
3.3.5.3. Hauteur	190
3.3.5.4. Largeur d'écoulement	192
3.3.6. Méthode de calcul des paramètres	193
3.3.7. Correction de l'effet de paroi.....	194
3.4. Mesures de terrain	196
3.4.1. Difficulté de l'approche.....	196
3.4.2. Pentas représentatives.....	196
3.4.3. Autres paramètres géométriques	198
3.4.4. Granulométrie.....	199
3.4.4.1. Objectifs des mesures - Restriction au cas d'une mesure locale	199
3.4.4.2. Particularité des torrents.....	199
3.4.4.3. Mesure par photo	200
3.4.4.4. Mesure par prélèvement linéique ou suivant une grille	200
3.5. Liste des figures.....	202

3.1. Introduction

La mesure d'une grandeur physique n'est jamais triviale et il est indispensable de pouvoir cerner l'incertitude qui y est liée avant de l'utiliser. De plus, les connaissances concernant l'hydraulique torrentielle sont si sommaires qu'il est généralement nécessaire de définir chaque paramètre avant d'en effectuer la mesure.

Ce chapitre est donc destiné à décrire et à critiquer les mesures réalisées.

De plus, les mesures de terrain sont assez rares pour qu'il paraisse intéressant de définir une méthode de mesure spécifique au cas des torrents. Il ne s'agit cependant dans ce chapitre que d'une méthode permettant la mesure d'une zone de granulométrie homogène, la prise en compte de la dynamique ne sera réalisée qu'après l'étude sur le terrain de la morphologie torrentielle.

Ce chapitre est peu lié à la physique des phénomènes, et n'est écrit que pour apporter un éclairage sur la validité des mesures. Dans une première étape, il est nécessaire de s'intéresser au concept de granulométrie et aux conditions de mesure d'une telle grandeur.

3.2. Mesure de granulométrie

Les difficultés rencontrées sont nettement mises en évidence par CARION (1986) qui cherchant à comparer deux méthodes de mesures, a effectué des relevés dans le même torrent que SOGREAH (le *Glandon* en Savoie). Les résultats sont les suivants (diamètre en cm) :

		SOGREAH	CARION	erreur relative
premier site	d_{50}	5	4	25%
	d_{90}	30	15	100%
second site	d_{50}	35	5	600%
	d_{90}	55	19	189%

L'auteur considère qu'il ne s'agit pas des mêmes échantillons et que la comparaison n'est pas possible. Cependant, prise indépendamment, chaque granulométrie aurait été considérée comme la granulométrie du *Glandon*.

Ce paragraphe ne traite absolument pas de la première étape de la mesure de granulométrie : le passage de la zone dont on veut déterminer la granulométrie à la zone de mesure. Ce travail, réellement difficile, ne sera abordé qu'au chapitre 7. On ne considère ici que la mesure des granulométries en rapport avec le charriage torrentiel.

3.2.1. Le concept de granulométrie

Il ne s'agit ici que d'une approche sommaire de la granulométrie visant uniquement à montrer qu'il s'agit d'une grandeur dont la définition est très complexe. Les études liées à ce paramètres sont nombreuses, mais on montrera par la suite que les incertitudes en torrents sont tellement importantes, qu'une approche sommaire de ce concept est suffisante.

La granulométrie correspond à la distribution de taille des éléments dans une population. Il s'agit d'une représentation statistique d'une population en termes de fréquence à partir de sa répartition en classes dimensionnelles. Il existe trois éléments définissant une mesure granulométrique (le paramètre entre parenthèses correspond à la méthode classique des tamis) :

- la dimension mesurée (maille de tamis),
- le paramètre correspondant au calcul de la fréquence (poids retenus par chaque tamis),
- le choix de la fréquence. Il existe deux types de fréquences : la fréquence en mesure et celle en nombre (c'est la fréquence en poids - donc en mesure - qui est retenue dans le cas de tamis).

Une étude détaillée de ces différents aspects théoriques a été réalisée au CEMAGREF par MEUNIER & CARION (1987). Elle s'est en particulier attachée à établir des équivalences entre les différentes méthodes d'obtention de granulométrie même si ce problème ne reçoit pas de solution dans le cas général.

La dimension mesurée est difficile à définir. En effet, un grain est un élément tridimensionnel, et la réduction à un seul paramètre d'un volume complexe engendre évidemment une perte d'information.

Une première démarche consiste à définir 3 "diamètres" pour définir la taille d'un grain comme le montre la figure suivante :

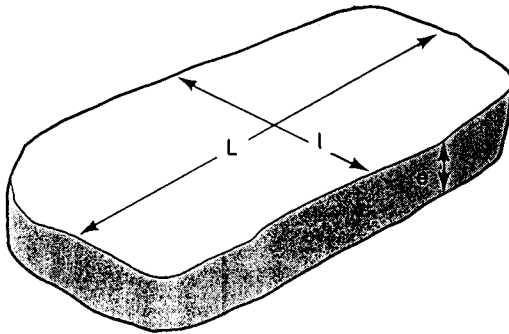


Figure 3-1 : Définition des trois dimensions orthogonales principales d'un grain (d'après DELOYE - 1987)

Il est alors possible de définir le rapport d'isométrie (e / L) et le degré d'allongement (L / l). PETIT (1989), par exemple, a étudié le début de mouvement à partir de ces rapports et montré que les forces tractrices nécessaires à la mise en mouvement des éléments plats sont près de 1.5 fois supérieures à celles qui sont nécessaires pour le mouvement des éléments arrondis de même diamètre.

Cependant, pour les applications courantes, on parle généralement du diamètre du grain. On considère alors que le diamètre intermédiaire (noté l sur la figure précédente) est égal à la taille de la plus petite maille de tamis à travers laquelle passe le caillou.

Le calcul de la fréquence.

Le calcul de la fréquence est faussé par les habitudes déjà prises : la mesure des diamètres de tamis avec calcul des fréquences en fonction du poids retenu par chaque tamis constitue la méthode de référence.

Or, une multitude d'autres mesures granulométriques sont possibles. Ainsi, d'autres méthodes existent comme celle proposée par BLUCK (d'après PEIRY & BRAVARD - 1985) qui préconise de choisir les trente plus gros galets sur un carré de 3 m de côté, d'en mesurer le grand axe et d'en calculer la moyenne. Une telle méthode présente deux inconvénients majeurs :

- D'une part, elle n'est pas applicable dans le cas de très gros éléments comme en torrent,
- De plus, il n'est pas possible d'établir une correspondance avec les granulométries classiques.

Ainsi, les méthodes sont grandement limitées et le calcul de la fréquence est réalisé de façon à ce que le résultat soit équivalent à la méthode des tamis. Le calcul de la fréquence ne correspond donc pas à un choix mais est défini de façon à obtenir une courbe granulométrique directement comparable à celles déjà existantes.

Dans leur étude établissant les liens entre les résultats obtenus par différentes méthodes, MEUNIER & CARION (1987) considèrent que :

"Dans le milieu des ingénieurs et hydrauliciens, la détermination des quantiles et de la courbe granulométrique ne pose en principe pas de problèmes méthodologiques particuliers : il est tacitement admis que la courbe granulométrique est obtenue par tamisage et pesage, la fréquence cumulée étant donnée par le rapport du poids cumulé au poids total de l'échantillon (...). Par contre, quand on veut caractériser la granulométrie d'un lit naturel, les choses deviennent plus compliquées et plusieurs problèmes méthodologiques se posent : la représentativité des points de mesure qui ne traduisent qu'une part limitée de l'espace, le bien fondé d'une prise d'échantillon volumique par rapport à un échantillon surfacique (notamment comment témoigner de l'existence du pavage ?), la prise en considération des éléments très gros qui ne se trouvent pas dans l'échantillon mais dans le lit. Enfin, un autre problème se pose, purement matériel celui là : l'utilisation d'une batterie de tamis accompagnée d'une balance, rend cette opération (...) quasiment impossible dans les torrents"

Trois méthodes de mesures sont décrites dans la suite. Hormis la classique méthode des tamis, les deux ont été proposées par MEUNIER & CARION pour répondre aux problèmes qu'ils soulèvent.

Ainsi, la méthode de mesure par traitement de photographie est destinée à fournir une indication sur la granulométrie de surface, alors que la réalisation de prélèvements linéiques est parfaitement adaptée à la réalité torrentielle.

Au préalable, il est nécessaire de définir les objectifs visés, les méthodes de mesures devant être adaptées au résultat attendu.

3.2.2. Objectif des mesures

La mesure de granulométrie ne peut se définir que par rapport à des objectifs. En effet, les mesures mais aussi les moyens employés différeront suivant que l'on étudie l'infiltration dans un cône de dépôt, le comportement rhéologique d'une lave ou les phénomènes liés au charriage.

Dans ce cas, il est clair que c'est la granulométrie correspondant à l'ensemble des éléments charriés qui doit faire l'objet de la plus grande attention. Or, comme l'a montré un rapide calcul au chapitre précédent, il apparaît que - sur le terrain - les éléments de moins de 1 cm de diamètre sont transportés en suspension dans les torrents durant les crues. Ainsi, il est possible de regrouper en une seule classe tous les éléments qui ont vraisemblablement un rôle secondaire dans le phénomène de transport solide. Cette démarche présente de multiples avantages pratiques et permet - en particulier - de déterminer très facilement la taille des éléments.

Pour les éléments plus grossiers, les classes granulométriques correspondent à un intervalle de 1 cm. Ce découpage en classes, indispensable pour le traitement des données, facilite aussi la détermination du diamètre des grains.

Pour les mesures sur modèle réduit, les méthodes classiques d'utilisation de tamis sont largement suffisantes. Après des tests destinés à en limiter le nombre, le jeu de tamis suivant a été employé pour les essais à 12 % de pente. Le tableau ci dessous correspond à la granulométrie de base^{ef} employée au cours des essais sur modèle réduit :

Taille modèle en 1/10 mm	Taille nature à l'échelle 1/80 en cm	Fraction pour la granulométrie de base
100	80	10
63	50.4	14
40	32	12
25	20	13
16	12.8	10
10	8	17
8	6.4	5
6.3	5	4.5
4	3.2	8
3	2.4	3.8
2	1.6	2.5
1	.8	0.4

On l'a vu au premier chapitre, dans le cadre des essais sur modèle réduit, la partie fine de la granulométrie n'est pas reproduite. C'est ce qui explique la fraction résiduelle des grains de moins de 0.1 mm. Or, pour un rapport d'échelle de 1/80, cela correspond à

^{ef} Ce signe signale les termes définis dans le glossaire.

une taille "nature" d'environ 1 cm. La taille à l'échelle 1/80 est indiquée car ce matériau est en similitude avec celui du torrent du St Vincent (Pyrénées Orientales) qui a fait l'objet de mesures de terrain et d'études sur modèle réduit. Cependant, cette échelle est seulement indicative car il est tout à fait envisageable que cette granulométrie soit en similitude avec des torrents à d'autres échelles¹.

3.2.3. Les différentes méthodes employées

3.2.3.1. Mesure par tamis

Il s'agit de la méthode de référence employée pour la détermination de la granulométrie.

Le matériau est trié dans une colonne de tamis, le "diamètre" du grain est la taille des mailles des tamis, et la fréquence est calculée comme la fraction de la masse de matériaux retenus dans chaque tamis.

Cependant, même cette méthode est discutable car les mailles circulaires ont une dimension alors que des mailles carrées, très répandues, en ont deux (le coté et le diamètre du carré). Or, le passage d'une forme de maille à une autre n'est pas trivial car dépendant de la forme de la section du grain! Cependant, l'écart entre les approches est toujours inférieur à $\sqrt{2}$, ce qui n'est problématique que dans le cas de granulométrie resserrée, et de grains de forme particulière.

Deux aspects doivent être abordés pour que cette méthode soit applicable aux torrents :

- sa mise en oeuvre dans le cas des torrents,
- l'obtention d'une mesure de la granulométrie de surface.

3.2.3.1.1. Mise en oeuvre

Pour pouvoir tamiser un matériau, il faut un tamis dont les mailles ont une taille supérieure au plus gros grain : pour beaucoup de torrents, cela signifie une maille d'au moins 2 mètres de diamètre! D'autre part, il faut pouvoir déplacer le matériau et l'orienter de façon à le faire passer dans la maille.

Enfin, ADAMS (1979) cite une recommandation de l'"American Society for Testing of Materials" selon laquelle le poids (W) de l'échantillon à considérer est donné par la formule :

$$W = 0.082 d_{\max}^{1.5} \quad (d \text{ en mm}) \dots\dots\dots (3-1)$$

avec $d=1000$ mm, il faut un échantillon de 2593 kg! Il apparaît cependant que cette formule sous estime la masse nécessaire pour les gros diamètres car le poids d'un grain

¹ Il s'agit cependant d'un ordre de grandeur. En effet, une échelle au 1/200 correspondrait à un d_{90} de l'ordre de 2.4 m, ce qui est très exceptionnel pour un lit alluvial. De même, une échelle de seulement 1/10 correspondrait à des grains d'au plus 10 cm de diamètre ce qui ne se rencontre pas dans les torrents avec une pente de 12 % (ou alors, le charriage n'est pas le phénomène prépondérant du transport solide).

- pour une forme constante - augmente avec le cube de son diamètre. Il faudrait donc probablement un échantillon beaucoup plus important.

Finalement, il apparaît que cette méthode est difficilement applicable aux conditions de terrain dans le cas des torrents.

3.2.3.1.2. Détermination d'une granulométrie de surface

Un autre problème, plus fondamental, est la difficulté de prendre en considération seulement les grains qui sont en contact avec l'écoulement. La seule solution applicable en torrent consiste à prélever les grains "proches de la surface" puis à les tamiser. Or, la précision d'une telle mesure est difficile à apprécier, mais elle est probablement assez faible. On considère généralement, que la couche pavée de surface à une épaisseur de l'ordre du diamètre des plus gros éléments (SIMON 1986).

Evidemment, cette démarche n'est possible que dans le cas d'une mesure sur modèle réduit, les problèmes de mise en oeuvre sur le terrain étant insolubles avec des moyens limités. Il n'est alors pas facile de "cisailer" le matériau sur une épaisseur aussi faible pour ne mesurer que les éléments de la surface.

La figure suivante illustre la variabilité du résultat dans l'utilisation de cette technique. Elle montre nettement une dispersion importante au niveau des éléments fins. Cette particularité s'explique par les variations de profondeur du prélèvement : il suffit de recueillir une épaisseur un peu plus importante pour que la quantité de matériaux fins augmente.

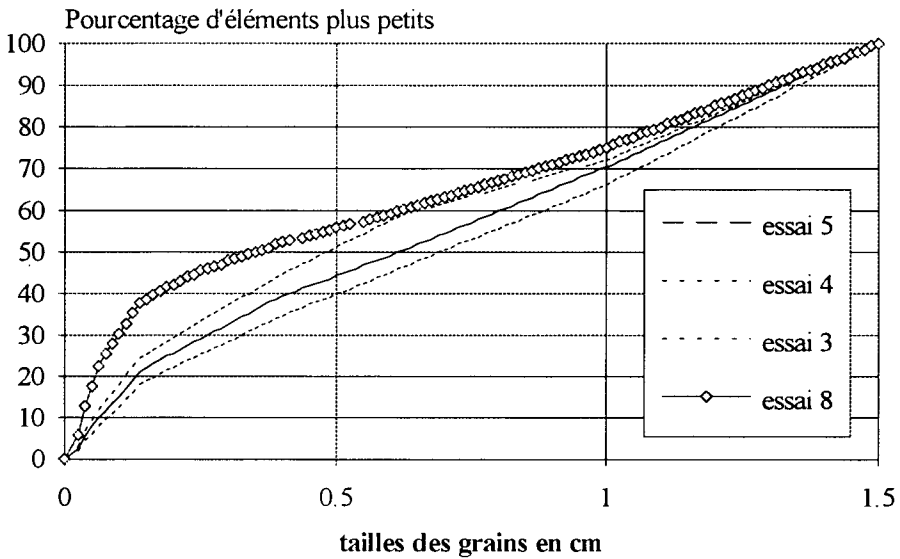


Figure 3-2 : Mesure après différents essais de la granulométrie de la surface par tamisage.

3.2.3.2. Mesure par photo

La mesure de la granulométrie à partir de photographie est une méthode appliquée au cas des torrents par MEUNIER & CARION (1987). La démarche est la suivante :

1. photographie perpendiculaire² au terrain d'une zone homogène (on prendra la précaution de placer un élément de longueur connue dans le champ de prise de vue pour éviter des calculs peu fiables sur les rapports d'échelle),
2. mesure de longueurs de traversée à partir de droites arbitrairement tracées sur la photo,
3. calcul des fréquences en pondérant par la longueur de traversée de chaque élément.

on a alors :

$$f_i = \frac{l_i f_{ni}}{\sum f_{ni} l_i} \dots \dots \dots (3-2)$$

avec

- f_i fréquence en longueur de traversée de la classe i
- l_i longueur moyenne de traversée de la classe i
- f_{ni} fréquence en nombre de la classe i

² En effet, si l'axe de la photographie n'est pas perpendiculaire au terrain, il y a un effet de perspective qui fausse les échelles. De plus, des défauts optiques apparaissent alors dans le cas de l'utilisation d'un grand angle. Il est cependant tentant de prendre des photos de biais, d'abord parce qu'elles sont beaucoup plus faciles, ensuite parce qu'il est possible d'avoir une vision plus large comportant des éléments grossiers. Mais le traitement nécessité en laboratoire pour obtenir une granulométrie plausible est très compliqué.

La photo 7.19 montre une telle mesure sur le torrent du *St Vincent* alors que la photo 3-4 correspond à une mesure sur modèle. On notera qu'il s'agit de la mesure de superficies très différentes, la mesure de terrain étant très ponctuelle alors que celle sur modèle couvre une surface qui correspond à des phénomènes de plus grande ampleur.

Cette méthode présente l'avantage d'être représentative de la granulométrie des éléments en contact avec l'écoulement sans nécessiter d'hypothèses sur l'uniformité et sur l'épaisseur de la couche de surface. D'autre part, elle est rapide et facile d'utilisation sur le terrain, car elle ne nécessite pas d'appareillage encombrant. Cependant, elle est mal adaptée aux granulométries grossières. En effet, pour être représentative il est nécessaire que la photo inclut de nombreux éléments grossiers.

Ainsi, pour un diamètre d'environ un mètre, il est indispensable de photographier une surface de plusieurs m², ce qui nécessite de placer l'appareil photo à plusieurs mètres de hauteur. L'appareillage alors nécessaire enlève beaucoup d'intérêt à la méthode.

CARION, pour remédier à cette difficulté, propose d'effectuer une correction pour "ajouter" les classes granulométriques grossières, absentes ou sous-représentées sur la photo. Il faut alors connaître la répartition granulométrique de ces classes par d'autres moyens.

Cet inconvénient est moindre dans le cas des mesures sur modèle. En effet, les plus gros éléments ont une surface de l'ordre de 1 cm² alors qu'il n'y a pas de difficulté à prendre une photo couvrant plus de 100 cm². Cependant, le problème se pose alors " dans l'autre sens " : il n'est plus possible de distinguer les éléments fins!

Cette difficulté a été "résolue" par KELLERHALS & BRAY (1971) qui proposent de ne pas considérer les éléments de moins de 8 mm de diamètre (pour des mesures de terrain). ADAMS (1979) justifie cette démarche en considérant que les matériaux fins s'ajoutent après le dépôt des éléments grossiers et qu'ils ne sont pas nécessaires pour étudier le déplacement des matériaux grossiers. On retrouve ici l'importance de bien dégager la finalité des mesures avant de les entreprendre.

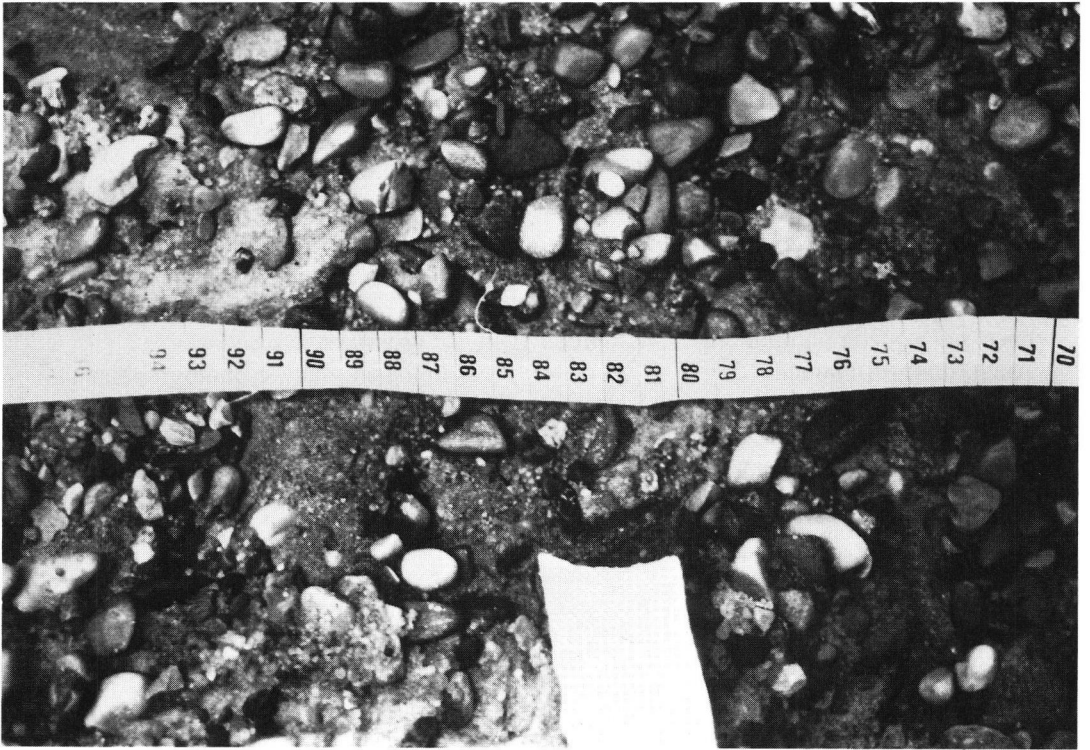


Figure 3-3 : Photo de la surface du lit dans le cas du **modèle** du torrent du St Vincent.

S'il n'est pas important de connaître avec précision la distribution des tailles des éléments fins, il faut pouvoir en apprécier la quantité. La méthode retenue consiste donc à faire une mesure par tamisage d'une zone préalablement photographiée. Il est alors possible de déterminer avec précision la répartition des éléments fins (de moins de 1 mm dans notre cas).

Le traitement photographique est fait ensuite en considérant des zones de sables sans chercher à y distinguer chaque grain. La répartition des diamètres est alors réalisée en considérant la distribution obtenue par calage. On obtient alors une courbe granulométrique synthétique du type suivant :

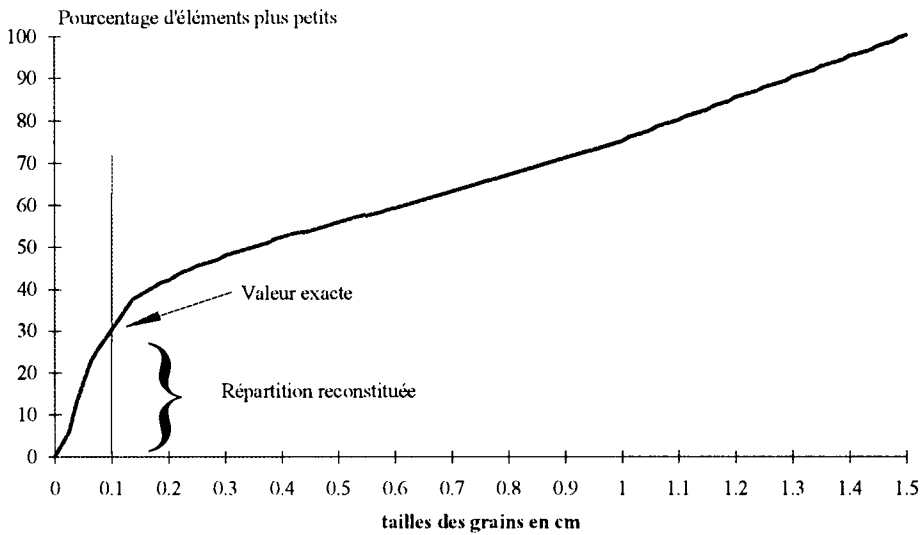


Figure 3-4 : Méthode de reconstitution de la répartition des éléments fins à partir de photographies.

Evidemment, une telle redistribution n'est satisfaisante que si elle est réalisée pour chaque type de morphologie³.

La figure suivante permet de confronter les mesures réalisées directement par prélèvement et tamisage et celles effectuées à partir de photo. Il ne s'agit pas des mesures qui ont été utilisées pour le calage de la répartition des éléments fins, ce qui permet d'avoir une approche rigoureuse de la validité de la méthode.

³ En effet, rien n'indique que la distribution des éléments fins soit la même dans une mouille et sur un seuil (par exemple).

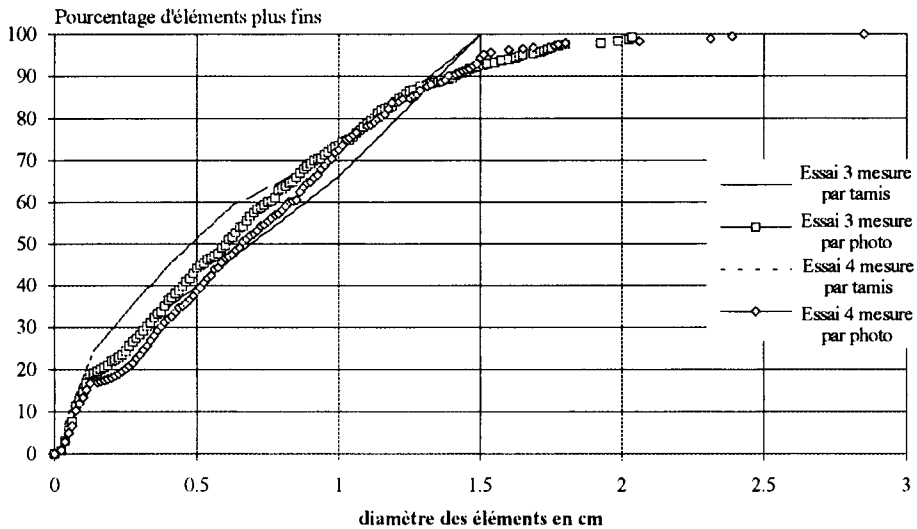


Figure 3-5 : Comparaison des granulométries obtenues par la méthode des tamis avec celles obtenues par traitement de photos.

Ce graphique permet de tirer deux conclusions :

- d'une part, il n'y a pas de différence significative entre les deux méthodes pour les diamètres inférieurs au d_{95} . Cela montre que les hypothèses retenues sont satisfaisantes et que la mesure de granulométrie montre une certaine robustesse.
- D'autre part, une divergence très nette apparaît pour les plus gros éléments.

Cet écart met en évidence une hypothèse formulée par MEUNIER & CARION lors de l'établissement des équivalences entre les granulométries : Ils ont considéré, qu'en moyenne, longueur de traversée et diamètre intermédiaire étaient égaux. Il y a en effet une bonne concordance dans le cas d'une granulométrie étendue (jusqu'au d_{95}).

Cependant, suivant la disposition des éléments, les longueurs de traversée peuvent être égales au grand diamètre des éléments et non plus au diamètre intermédiaire. Cette méthode est donc capable de générer des éléments de taille très exagérée. C'est le cas ici où quelques rares diamètres excèdent 2.5 cm. Or l'échantillon ne comportait aucun élément dont le diamètre intermédiaire avait cette taille.

Une telle déviation est systématique, mais n'est jamais intervenue en deçà du d_{90} . Cependant, elle dépend largement de la forme des éléments. Si ceux ci avaient une forme de baguette, une méthode utilisant la longueur de traversée ne serait plus admissible.

Le même phénomène peut aussi se produire dans le sens d'une minimisation des diamètres : imaginons un matériau constitué de billes de diamètre uniforme : même le d_{90} serait inférieur au diamètre des billes.

Pour mieux cerner cet aspect, la longueur de traversée et les trois diamètres de graviers de granulométrie resserrée ont été mesurés. La figure suivante montre nettement le comportement de la longueur de traversée :

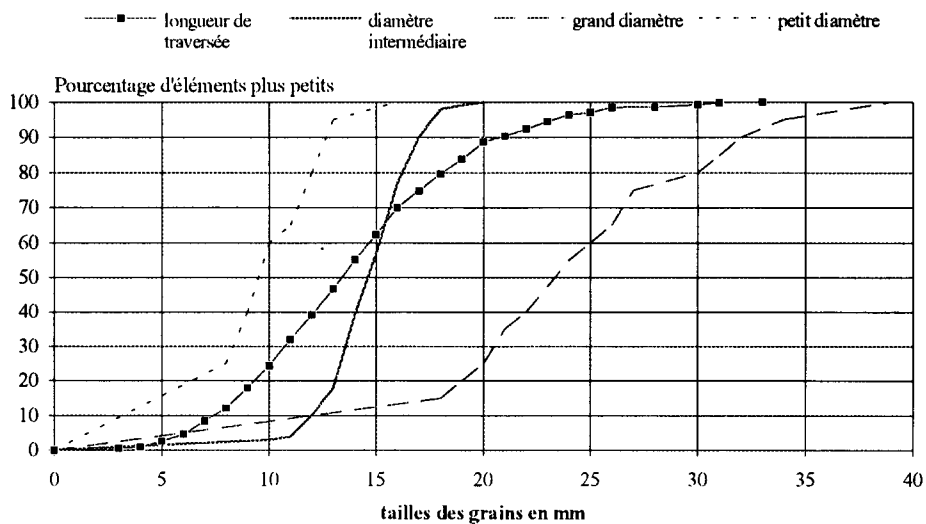


Figure 3-6 : Confrontation de la longueur de traversée avec les trois diamètres caractéristiques.

Cependant, on a vu précédemment que dans le cas d'une granulométrie aussi étendue que dans les torrents, la tendance de la méthode de la longueur de traversée à allonger la granulométrie est très généralement négligeable. Tous les tests comparatifs ont montré une évolution semblable à celle que l'on observe à la figure 3-6. Il apparaît donc que pour les tailles inférieures au d_{90} il n'y a pas de transformation notable de la courbe granulométrique si l'on considère les longueurs de traversée au lieu du diamètre intermédiaire.

3.2.3.3. Mesure par échantillonnage linéique

Aucune des méthodes précédentes n'est satisfaisante pour des mesures de terrain. Très tôt, WOLMAN (1954) a proposé une méthode basée sur un échantillonnage linéique. La démarche est la suivante :

1. On dispose sur le sol un élément de référence (chaîne d'arpenteur, décamètre, etc...).
2. On prélève tous les cailloux qui se trouvent sous les graduations correspondant à un pas d'espace prédéfini,
3. On mesure le diamètre intermédiaire du caillou,
4. La fréquence utilisée est ensuite une fréquence en nombre, un élément étant compté autant de fois qu'il apparaît sous les graduations.

L'équivalence avec la méthode des tamis a été étudiée par CAO (1985) qui a mesuré la granulométrie de matériau de laboratoire avec la méthode de WOLMAN. Il y a alors une très bonne concordance des deux méthodes. Il s'agissait cependant d'une granulométrie resserrée.

Cette démarche est bien adaptée au cas des torrents car elle nécessite un appareillage très simple et permet de traiter des éléments de grande taille. Il est possible aussi d'effectuer un prélèvement des matériaux suivant une grille, lorsque l'on veut couvrir une zone. En fait, La seule condition importante est d'effectuer un prélèvement réellement aléatoire et d'éviter tout choix subjectif.

3.2.4. Incertitudes de mesure

3.2.4.1. Méthode employée

Il est indispensable de connaître la validité d'une mesure de granulométrie. De telles mesures sont difficiles et longues à réaliser. L'objectif n'est pas de définir le moyen permettant d'obtenir la plus grande précision possible mais plutôt d'optimiser le "rapport qualité/prix" de la mesure. Il s'agit donc de définir une méthode de mesure adaptée aux torrents plutôt que d'un simple contrôle de la précision des valeurs obtenues.

Une attention particulière est apportée au cas des mesures de terrain, car c'est dans ce domaine que les recherches ont été les plus rares et que les lacunes sont les plus criantes. En effet les sources d'incertitudes s'accumulent. La liste suivante les présente par importance croissante :

1. **Erreur induite par la méthode employée.** Cet aspect a été abordé précédemment et peut être considéré comme peu influent par rapport aux suivants. Il n'est donc plus abordé dans la suite de l'étude.
2. **Erreur de mesure de la longueur** (diamètre intermédiaire ou longueur de traversée) en fonction de l'appareil choisi,
3. **Influence de l'opérateur** sur la mesure,
4. **Effet de la taille de l'échantillon.**

Une approche théorique des points 1. et 4. a été conduite par MEUNIER & CARION, mais, il est alors nécessaire - en particulier pour le traitement des erreurs introduites par l'échantillonnage - de faire des hypothèses sur la distribution granulométrique. D'autre part, les autres points (erreur de mesure et influence de l'opérateur) sont inaccessibles par ce moyen.

Une approche complémentaire est donc réalisée ici. Elle comporte deux aspects :

- Trois opérateurs ont effectué des mesures suivant différentes méthodes. Il est ainsi possible d'avoir une bonne estimation des erreurs commises. Des mesures spécifiques ont été effectuées sur le torrent du Bresson (à proximité de Grenoble) dans des zones où les matériaux ont été remaniés récemment.
- Ensuite, des simulations sur de très gros échantillons ont été réalisées pour dégager une taille optimale d'échantillon.

3.2.4.2. Incertitude de la mesure de la longueur en fonction de la méthode employée

Il s'agit là de déterminer le moyen de mesure à employer pour déterminer le diamètre intermédiaire.

Il est facile d'isoler l'effet de l'erreur de mesure : il suffit de prendre en compte le même échantillon. Le principe est le suivant : des éléments sont prélevés de façon aléatoire, puis, chaque opérateur en effectue indépendamment la mesure. Les résultats concernant chaque appareil de mesure sont décrits, puis, une synthèse dégage les méthodes les plus pertinentes.

3.2.4.2.1. Granulomètre

Il s'agit d'un instrument présentant des mailles carrées dont le coté varie entre 0.5 et 10 cm. Il permet donc de déterminer le diamètre de la plus petite maille dans laquelle passe l'élément.

La précision de la mesure reste dépendante de l'orientation de l'élément. En pratique, cet aspect est important car dans certains cas, ce choix est loin d'être trivial. Lors des essais, les valeurs inférieures à 10 cm sont toutes obtenues avec le granulomètre.

Dans tous les cas les écarts entre les mesures - réalisées par différents opérateurs - sont très faibles. La figure suivante montre l'écart de mesure pour le même échantillon entre une mesure soignée et une mesure très rapide. La différence est très réduite.

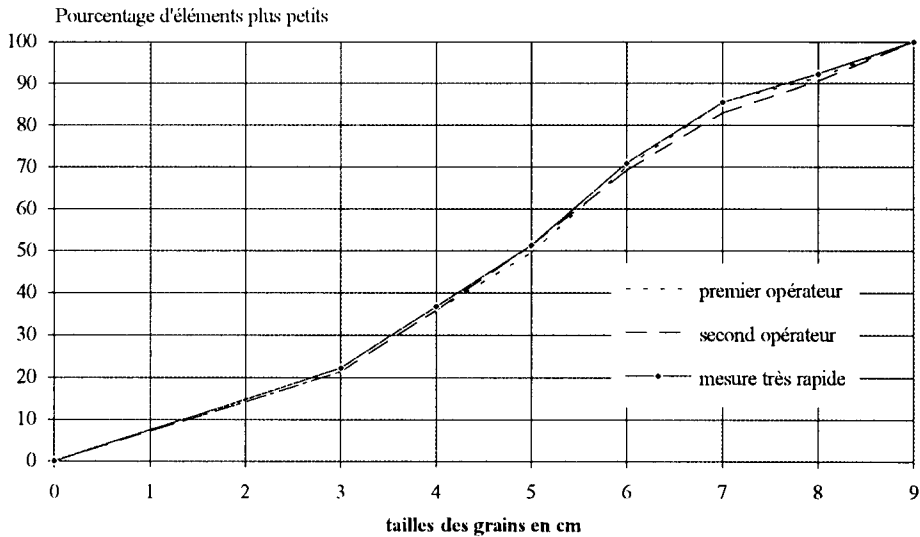


Figure 3-7 : Comparaison de trois mesures utilisant le granulomètre sur le même échantillon.

Il apparaît que même dans le cas d'une utilisation très rapide, les mesures sont d'une très bonne précision. Cependant, cet appareil présente deux défauts : les mesures sont assez lentes et ne peuvent concerner que les éléments de moins de 10 cm.⁴

3.2.4.2.2. Mètre

Un moyen pratique de déterminer la taille de l'élément est de mesurer son diamètre intermédiaire et non plus la taille de la plus petite maille qu'il peut traverser. La grandeur considérée est alors différente. La figure suivante montre les mesures réalisées à partir du même échantillon que précédemment :

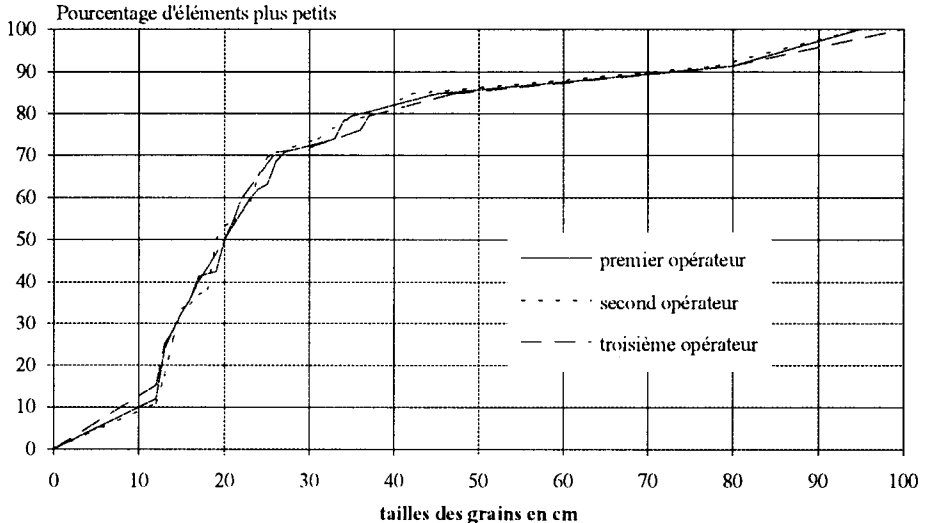


Figure 3-8 : comparaison des mesures de diamètre intermédiaire réalisées avec un mètre.

Il faut noter le changement d'échelle entre les deux figures précédentes. La partie correspondant aux mesures avec granulomètre n'a pas été détaillée mais seul le pourcentage total d'éléments de moins de 11 cm est reproduit sur ce graphique.

3.2.4.2.3. Compas

Une méthode plus rigoureuse consiste à employer un compas (pied à coulisse de grande taille). Les erreurs liées directement à la mesure de la grandeur choisie sont alors très réduites mais le choix du diamètre intermédiaire reste entier ce qui n'est pas trivial lorsqu'il n'est pas possible de déplacer facilement les blocs. L'utilisation du compas sur le terrain s'avère cependant peu pratique. La figure suivante compare les

⁴ Il faut noter que la construction d'un modèle comportant des mailles plus importantes n'est pas difficile mais que l'appareil prend alors rapidement des proportions incompatibles avec une utilisation en torrent. D'autre part, le passage dans une maille impose de déplacer les blocs, ce qui est difficile lorsqu'ils dépassent un diamètre de l'ordre d'une vingtaine de cm.

mesures obtenues avec le compas et les mesures obtenues en mesurant directement avec le mètre :

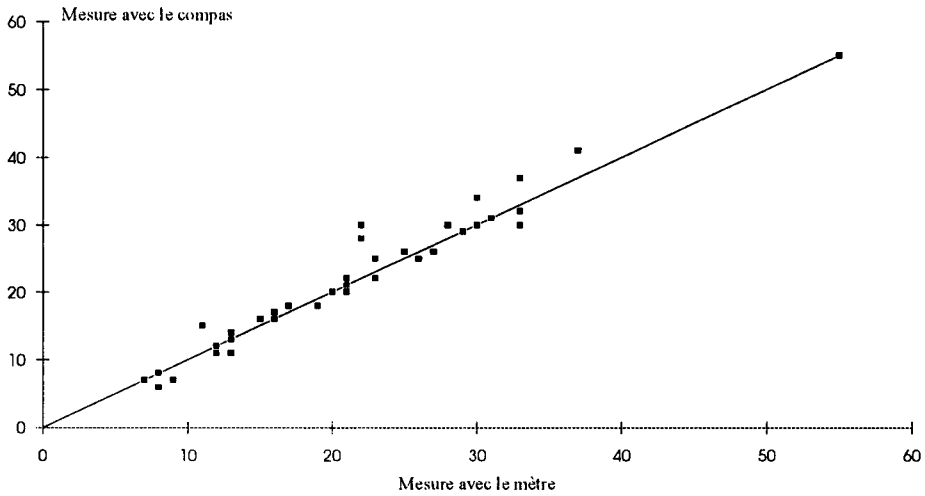


Figure 3-9 : Comparaison des diamètres obtenus avec un compas et des valeurs directement mesurées avec un mètre.

3.2.4.2.4. Longueur de traversée

La longueur de traversée est facile à mesurer sur photographie. Il semblait intéressant de la comparer aux précédentes pour mieux déterminer les erreurs possibles. Seuls 36 éléments ont fait l'objet de telles mesures dans le cas du Bresson.

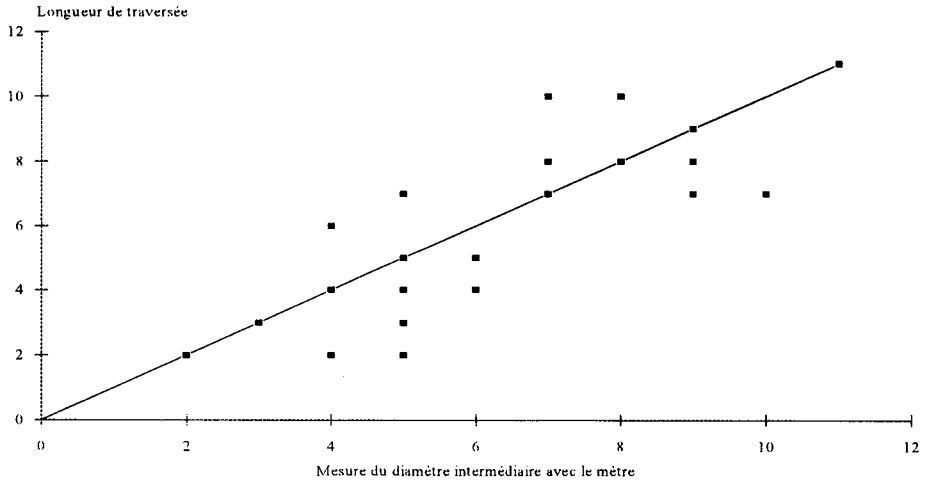


Figure 3-10 : Comparaison entre les longueurs de traversée et les mesures obtenues avec le mètre.

3.2.4.2.5. Comparaison des différentes mesures

Les principaux résultats sont les suivants :

- Pour les gros éléments, les mesures au mètre sont inférieures à celles obtenues avec le compas (comme le montre la figure 3.10.). La droite de corrélation a une pente de 1.052. Cet écart semble explicable par l'effet de perspective que l'on rencontre souvent lors de mesures rapides avec un mètre. Ces résultats restent valables pour les trois diamètres des éléments. Il y a alors un biais systématique lors des mesures avec le mètre si l'on n'y prend pas garde.
- Pour les tailles plus réduites, les mesures au granulomètre et au mètre montrent une dispersion relativement importante, mais il n'y a pas de biais systématique. L'introduction des deux autres diamètres de l'élément pour expliquer la mesure a échoué : le passage dans une maille est une caractéristique vraiment tridimensionnelle.
- La confrontation des mesures au mètre et des longueurs de traversée montre qu'il n'y a pas non plus de biais important. Par contre, la dispersion est considérable⁵. Cette différence traduit le fait qu'il s'agit de deux paramètres différents ce qui n'est pas le cas précédemment où l'outil de mesure changeait mais pas la grandeur. On retrouve, de façon beaucoup moins marquée, les tendances déjà exposées avec les graviers de granulométrie resserrée.

Enfin, le mètre s'impose par sa facilité d'emploi et la bonne précision qu'il apporte.

3.2.4.2.6. Distribution des erreurs

On ne considère que les incertitudes liées à la méthode de mesure avec un mètre. Il faut distinguer deux sortes d'erreurs :

- l'erreur systématique qui décale l'ensemble de la courbe granulométrique et qui a toujours été inférieur à 0.37 cm au cours des mesures précédentes ce qui représente moins de 1 % du d_{90} . On verra que c'est une valeur bien inférieure aux erreurs d'échantillonnage.
- l'erreur aléatoire qui est supposée de moyenne nulle et qui déforme la courbe granulométrique. On considère classiquement que ce type d'erreur suit une loi normale. Cependant, comme le montre la figure suivante, la discrétisation en classes de 1 cm d'amplitude diminue largement cette erreur et elle ne suit plus une loi normale, mais il y a au contraire une accumulation des valeurs à 0.

⁵ On a vu cependant, dans le cadre des mesures par photo sur un modèle réduit, que les distributions de taille étaient assez proches dans le cas d'une granulométrie étendue (sauf au delà du d_{90}).

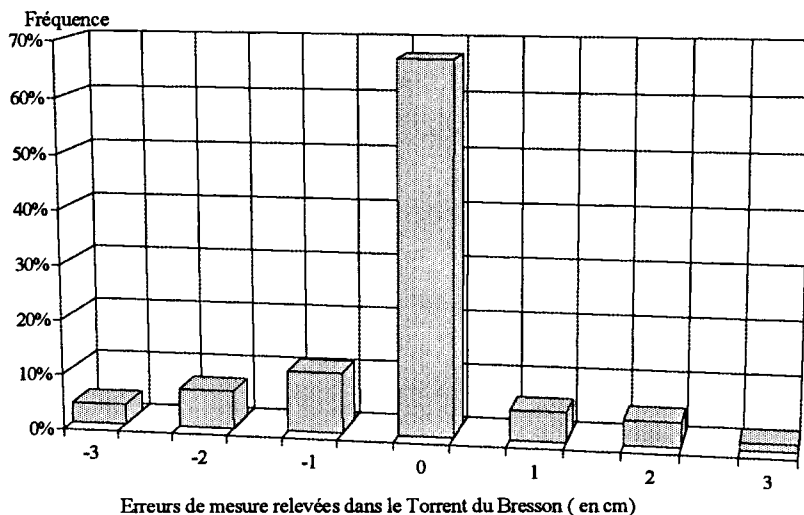


Figure 3-11 : Distribution des erreurs de mesures (écart entre les valeurs obtenues par la même méthode sur le même échantillon).

Finalement, les erreurs de mesures des grandeurs (diamètre ou longueur de traversée) sont donc toujours très faibles et n'ont qu'une influence négligeable sur la courbe granulométrique, sauf dans le cas d'un biais systématique.

Ainsi, il est indispensable, dans le cas de mesure des diamètres avec un mètre de corriger les erreurs de parallaxe dès que la taille des éléments devient importante.

3.2.4.3. Effet d'échantillonnage

3.2.4.3.1. Echantillonnage dans une même population

C'est évidemment une question centrale des mesures de granulométrie. CARION (1986) a choisi une démarche basée sur une analyse statistique ce qui le contraint à faire l'hypothèse que la distribution granulométrique suit une loi Log-normale.

Sa démarche est la suivante :

- il se base sur un échantillon initial de seulement 41 éléments alors que WOLMAN considère qu'il faut prélever une centaine d'éléments. Or il est peut probable qu'il préconise finalement une taille d'échantillon inférieure à celle de son échantillon de base.
- il considère l'erreur sur le d_{50} alors que l'incertitude est nettement plus importante pour le d_{90} .
- il fixe "arbitrairement" un intervalle de confiance de 2 cm et une probabilité de 0.9 d'être à l'intérieur de cet intervalle. Ce choix arbitraire est inévitable dans le cadre d'une telle démarche : on sait que la précision sera maximale pour un

effectif très grands (infini) de mesure. Il faut donc toujours choisir une limite cohérente avec la variabilité du paramètre.

Finalement, il obtient, pour son cas particulier, qu'il suffit de 20 prélèvements pour que le d_{50} ait 90% de chances de se trouver entre 3 et 5 cm.

HEY & THORNE (1983), à partir d'échantillons beaucoup plus importants ont dégagé deux sortes d'incertitudes : celle provenant de la méthode d'échantillonnage qui est importante pour un échantillon de moins de 100 éléments, et celle due à l'opérateur qui apparaît pour des échantillons de quelques centaines d'éléments, c'est à dire quand la première devient négligeable. On retrouve, là encore, qu'un échantillon d'une centaine d'éléments permet de réduire considérablement l'incertitude correspondant à l'échantillonnage.

Pour aborder ce problème, nous avons abordé une autre démarche : elle consiste, à partir de très gros échantillons (plus de mille éléments), à simuler des tirages de taille variable et d'étudier l'écart de la granulométrie de chaque échantillon avec celle de la population initiale.

Il est alors nécessaire de définir un critère permettant une quantification de l'écart entre les courbes granulométriques. Plutôt que d'effectuer une comparaison sur un ou deux déciles (d_{50} et d_{90} par exemple) un critère plus global a été choisi : **la Différence Normée**. Elle se définit de la façon suivante :

$$DF = \sum_{i=1}^{10} \frac{(t_i - d_i)^2}{d_i t_i} \dots\dots\dots (3-3)$$

avec

d_i décile i de la première courbe

t_i décile i de la seconde courbe

Elle permet ainsi de donner une image de l'écart sur la globalité de la courbe.

3.2.4.3.1.1. Taille de l'échantillon

La démarche suivante a été conduite en considérant deux sites particuliers :

- Le *Bresson* déjà évoqué où 1200 prélèvements ont été réalisés suivant une grille à mailles carrées de 10 cm de coté. Cela représente donc une surface totale de 10 m × 12 m dans un dépôt partiellement lavé. La pente est d'environ 14 %.
- Le *Torrent Des Glaciers* (Savoie) a fait l'objet d'une démarche similaire : dans une zone de granulométrie globalement homogène (dépôt latéral avec une pente d'environ 2%), 1600 prélèvements ont été réalisés à partir d'un quadrillage de 40 × 40 correspondant à un carré de 100 m² pour des mailles de 25 cm de côté.

Il est tout à fait admissible de faire l'hypothèse que ces zones sont globalement homogènes. Un millier de tirages ont été réalisés comme précédemment et ont conduit au graphique suivant :

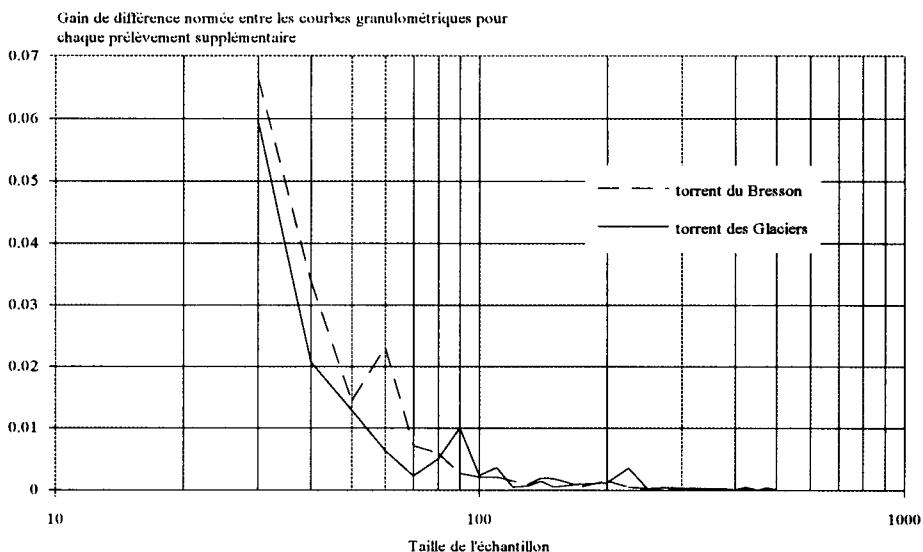


Figure 3-12 : Gain de différence normée par prélèvement.

Le gain de différence normée pour chaque prélèvement est défini par la formule suivante :

$$G(t_2) = \frac{DF(t_1) - DF(t_2)}{t_2 - t_1} \dots \dots \dots (3-4)$$

avec

- t_1 taille 1 d'échantillon
- t_2 taille 2 d'échantillon
- $DF(t)$ différence normée correspondant à la taille t
- $G(t)$ gain de différence normée pour chaque prélèvement

Ce gain correspond donc à la précision que l'on gagne à chaque fois que l'on ajoute un grain à l'échantillon. Evidemment, plus l'échantillon est réduit, plus le prélèvement d'un grain augmente la précision. La détermination d'une taille d'échantillon est donc un compromis entre le travail nécessaire et la précision souhaitée. Il apparaît qu'au-delà d'une taille de 100 prélèvements le gain est très faible puisque la différence normée n'est jamais diminuée de plus de 0.005.

Les deux courbes sont proches, pour des morphologies très différentes, montrant ainsi que ce résultat ne dépend que très peu de la zone de mesure. De plus, ce résultat a été confirmé à partir des mesures sur d'autres torrents⁶. Il semble donc tout à fait généralisable à toutes les mesures réalisées dans des lits générés essentiellement par du charriage torrentiel.

⁶ Dans ces cas, l'échantillon de très grande taille était réalisé en regroupant l'ensemble des mesures effectuées dans une zone du torrent. Si le choix des sites de mesure dans le torrent n'était pas arbitraire (l'objectif est cependant de couvrir toutes les zones du torrent) cela correspondait à un changement d'échelle par rapport à ces mesures sur un quadrillage.

Il est intéressant de mieux connaître l'évolution de l'incertitude en fonction du décile considéré. Ainsi, pour une centaine d'éléments, la figure ci dessous montre la répartition de la différence normée :

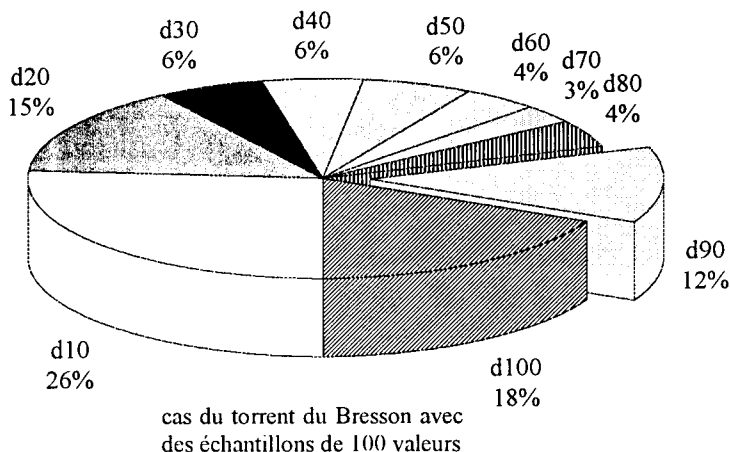


Figure 3-13 : Répartition de la différence normée par décile

Tout naturellement, les déciles les plus difficiles à estimer correspondent aux extrémités de la courbe granulométrique mais aussi aux plus petits car il s'agit d'une erreur relative. Ainsi, le d_{50} est estimé - comme le d_{30} - avec une bonne précision, mais le d_{90} , pourtant très utile, est le décile usuel qui souffre le plus des erreurs d'échantillonnage. Ainsi, dans le cas d'une étude ne nécessitant que la détermination du d_{50} il est possible de réduire la taille de l'échantillon.

Cependant, dans le cas général, on optimise la mesure de granulométrie en prélevant des échantillons de 100 éléments. C'est ce qui a été réalisé dans la suite de ce travail.

3.2.4.3.1.2. Intervalle de prélèvement

Une première approche empirique sur le Torrent de *St Vincent* avait montré que le pas de prélèvement optimal était de l'ordre du d_{90} . En effet, les zones homogènes en torrent couvrent généralement de faibles surfaces. Il faut donc un pas de prélèvement aussi faible que possible pour pouvoir effectuer la mesure dans une zone réduite.

Cependant, il faut éviter de "sur-échantillonner" les éléments grossiers. En effet, chaque élément étant compté autant de fois qu'il se trouve sous une graduation, il faut parvenir à mesurer un assez grand nombre d'éléments différents pour avoir une mesure significative. Intuitivement il semble qu'un pas de prélèvement de l'ordre du d_{90} est satisfaisant.

Pour valider cette hypothèse, l'expérience suivante a été conduite : les intervalles de prélèvements ont été très réduits (10 cm) pour pouvoir déterminer la valeur optimale à partir de l'auto-corrélation de mesures successives. La granulométrie ne présentait

aucune particularité influençant⁷ ce calcul. Une première approche consiste à prendre en compte la périodicité des diamètres. La figure suivante montre la fonction auto-corrélation pour l'ensemble des valeurs.

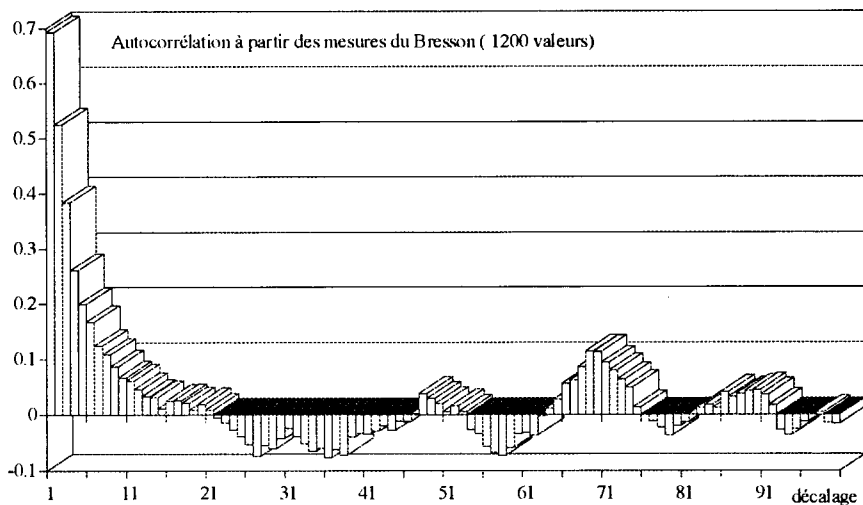


Figure 3-14 : Auto-corrélation correspondant aux 1200 mesures effectuées sur le torrent de *Bresson*.

Cette approche permet de faire les remarques suivantes :

- la corrélation entre deux ou trois valeurs consécutives est importante. Cette situation s'explique peut-être par l'homogénéité granulométrique locale, mais surtout par les gros éléments qui sont comptés plusieurs fois consécutives.
- La décroissance est très rapide : le coefficient de corrélation devient inférieur à 0.3 pour un décalage de 4 valeurs soit 40 cm (C'est à dire de l'ordre du d_{90}). Enfin, la liaison entre les valeurs n'est plus significative pour un décalage supérieur à un mètre (10 valeurs).

Ainsi la bonne auto-corrélation pour un pas de quelques dizaines de centimètres montre qu'il est superflu ici d'effectuer des mesures avec un pas de prélèvement inférieur à 40 ou 50 cm. Cela correspond au d_{90} dans un cas plus général.

Ces résultats ont été confirmés par les mesures sur le *Torrent des Glaciers*. Le pas de prélèvement avait été fixé à 25 cm (voir paragraphe 7.6.8).

Finalement, il apparaît que la distance minimum entre deux éléments doit être supérieure au d_{90} pour éviter la mesure d'informations redondantes.

⁷ Par exemple par la présence de deux zones homogènes de caractéristiques tranchées ou par la répétition d'un motif comme cela se produirait dans le cas de deux lits semblables entaillant une terrasse homogène.

3.2.4.3.2. Variabilité à l'intérieur d'une zone donnée

Il s'agit ici de connaître l'influence du choix de l'échantillon dans une zone de mesure déjà délimitée. Pour cette étude, six transects ont été mesurés dans une même zone. On obtient alors les courbes granulométriques suivantes :

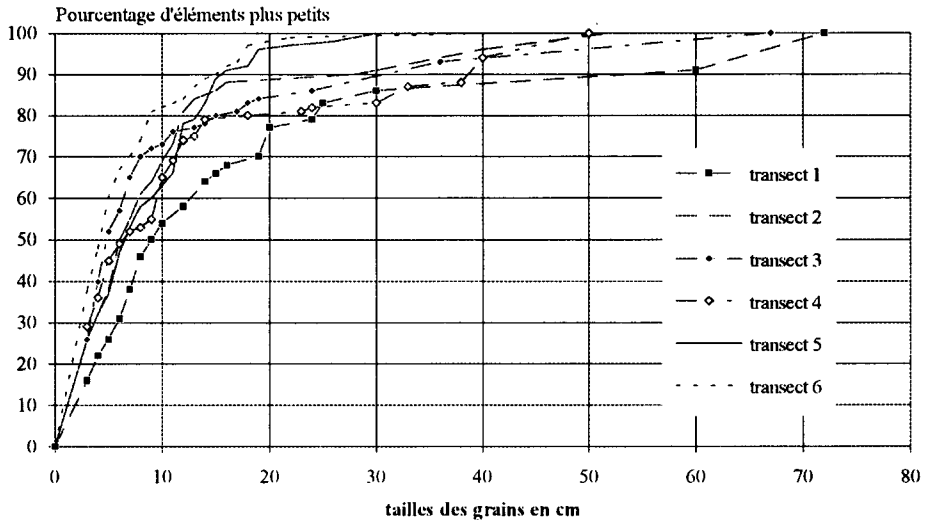


Figure 3-15 : Comparaison de mesures réalisées dans la même zone suivant six transects.

Il apparaît très nettement que la dispersion est très importante. Le tableau suivant reproduit les principaux déciles pour chacune des six courbes :

	d_{30} (cm)	d_{50} (cm)	d_{90} (cm)
Transect 1	5.8	9.0	54.0
Transect 2	3.3	4.8	30.9
Transect 3	3.1	6.3	38.7
Transect 4	3.7	6.5	15.5
Transect 5	3.7	6.0	28.0
Transect 6	2.3	4.2	15.0
Rapport de la plus grande valeur à la plus faible	187 %	214 %	360 %

Ces écarts, pour une même zone, montrent clairement que les effets des erreurs de mesures des diamètres, de l'influence de l'opérateur et même de la taille des échantillons sont faibles par rapport à la variabilité naturelle de la granulométrie, même dans une zone "homogène".

3.2.4.4. Cas des longueurs de traversées sur photo

Pour les meures par photo, l'approche est la même, sauf sur un point : le calcul des fréquences est pondéré par la longueur de traversée de chaque élément. On utilise la même démarche que précédemment mais en pondérant le calcul des fréquences par la taille de l'échantillon.

Les mesures par photo n'ont été utilisées que pour fournir une granulométrie de surface dans le cas des modèles réduits. C'est donc à partir de telles données que le calcul par tirage d'échantillons de même taille est réalisé.

Comme précédemment, on calcule ici le gain de différence normée obtenu pour chaque mesure. En considérant les mesures réalisées sur canal étroit (granulométrie uniforme à l'échelle de chaque photo), on obtient la courbe suivante :

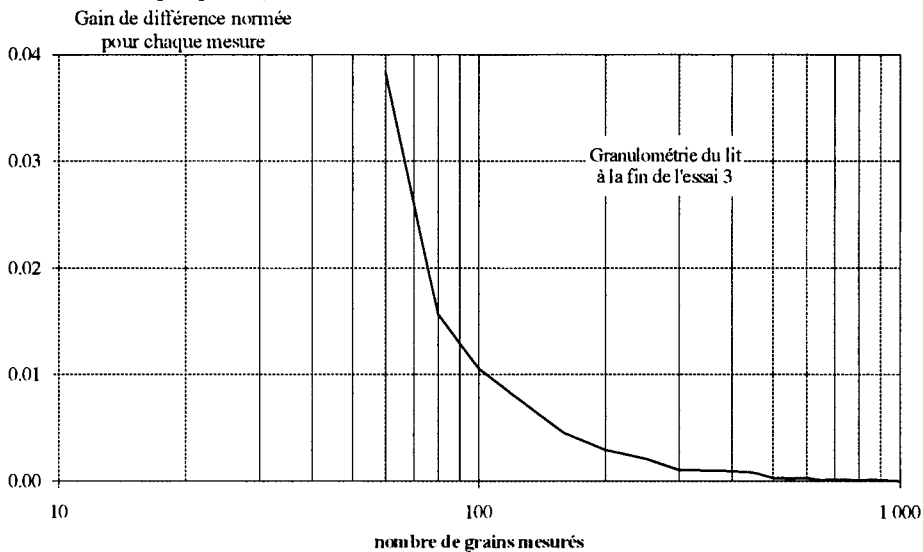


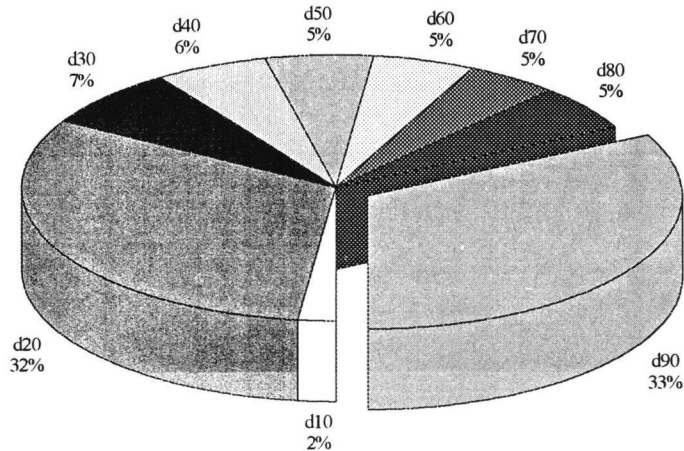
Figure 3-16 : Evolution du gain de la différence normée en fonction de la taille de l'échantillon.

Il apparaît que, pour un même gain, il est nécessaire de faire plus de mesures que dans le cas des mesures par échantillonnage linéique.

Cette différence s'explique par le calcul des fréquences en longueur. De plus, l'allongement artificiel de la courbe granulométrique renforce encore ce phénomène : avec la granulométrie qui a servi à effectuer cette simulation, la plus grande longueur mesurée est de 4,1 cm alors que le diamètre moyen est de l'ordre de 0.5 cm.

Ainsi, dans le cas d'un échantillon d'une centaine d'éléments, la mesure de ce bloc (dont le "poids" dans le calcul de la fréquence est 300 fois plus élevé que les grains les plus fins) va faire passer le d_{90} de 1.1 à 4.1 cm!

Dans ce cas deux phénomènes s'ajoutent pour entraîner une plus faible précision de la courbe granulométrique. Ainsi, dans le calcul précédent, les très fortes variations du d_{100} n'ont pas été prises en considération.



Lit à la fin de l'essai 3 avec 200 mesures de longueurs

Figure 3-17 : Répartition de la différence normée par décile pour les mesures de longueur de traversées.

On retrouve le même type de répartition qu'à la figure 3-14, mais avec une influence accrue du d_{90} .

Finalement, les mesures de longueurs nécessitent d'effectuer un plus grand nombre de mesures que les prélèvements linéiques (il apparaît que le traitement de 200 éléments correspond au même gain que 100 éléments dont on mesure le diamètre intermédiaire). Cependant, lorsque l'on utilise une table à digitaliser et que le traitement est entièrement informatisé, la mesure d'une longueur est nettement moins fastidieuse que la détermination d'un diamètre sur le terrain. Cet écart n'est donc absolument pas un handicap pour cette méthode de détermination de la granulométrie.

3.2.4.5. Conclusion

Il apparaît donc qu'il est possible d'effectuer la classification suivante des différentes incertitudes liées à la mesure d'une granulométrie depuis la plus importante à la plus faible :

- **le choix de l'échantillon.** Les variations sont alors très importantes mais il n'y pas de moyen pour limiter ce phénomène dépendant du choix de la zone de mesure, hormis de multiplier les mesures afin de couvrir de nombreuses zones. Cet aspect est directement lié à la finesse de la lecture morphologique de la zone d'étude.
- **La taille de l'échantillon.** On a vu que pour optimiser le temps consacré à la détermination de la granulométrie, il est souhaitable de prendre en considération un échantillon d'une centaine d'éléments dans le cadre des prélèvements linéiques et de deux cents grains lors de mesures de longueurs de traversée.

Cette conclusion est valable dans le cas d'une faible variabilité naturelle de la granulométrie. En effet, lorsque le lit torrentiel présente une très forte hétérogénéité

granulométrique, il est possible de diminuer la taille de l'échantillon sans réduire la précision globale de la mesure car la mesure sera très dépendante d'un site à l'autre même avec des échantillons de grande taille. Cependant, il s'agit d'une adaptation au cas par cas, et très dépendante de l'objectif de l'étude.

- **L'erreur de mesure du diamètre** qui n'a d'influence que lorsqu'elle introduit un biais systématique.

Il est cependant possible, en prenant des précautions, d'obtenir des mesures significatives. En effet, si les gradients granulométriques sont importants au sein d'une zone "homogène", les variations sont beaucoup plus importantes d'une zone morphologique à une autre mais aussi d'une zone du torrent à une autre. Ainsi, les erreurs de mesure de ces paramètres deviennent faibles par rapport à leurs variations naturelles. Ces écarts seront traités au chapitre 7 consacré à l'interprétation des mesures de terrain.

3.3. Mesures sur modèle réduit

C'est évidemment dans le cas du modèle réduit que les mesures sont les plus faciles :

- le modèle se trouve dans un laboratoire ce qui facilite la mise en place d'appareils,
- l'opérateur a une bonne maîtrise des phénomènes et il est possible de renouveler les crues de façon à mettre au point les appareils.
- la taille réduite des éléments à mesurer facilite l'opération.

Pourtant, même dans ce cas, un suivi fin des phénomènes est difficile à réaliser et il est nécessaire de définir avec précision les éléments à quantifier.

Trois modèles réduits distincts ont été utilisés dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau ci dessous. Ils correspondent aux trois échelles d'analyse des phénomènes torrentiels adoptés dans ce travail.

	largeur (cm)	longueur (cm)	pente du canal (%)	débit liquide maxi	débit de formation du pavage
modèle ponctuel	10	100 à 200	12	0.5	0.2 à 0.3
modèle bidimensionnel	60	200	12	0.5	0.3 à 0.4
plate-forme torrentielle [†]	500	1 500	12	3.2	0.2 à 0.45

Le protocole des essais est détaillé en au chapitre 4, 5 et 6.

3.3.1. Similitude des mesures sur modèle réduit

Avant de détailler les différentes incertitudes des mesures réalisées sur modèle réduit, il est nécessaire de s'interroger sur la signification des résultats obtenus sur un modèle par rapport au terrain. Ce paragraphe aborde donc la similitude qui existe entre les observations sur modèle.

Trois règles doivent être respectées pour que le modèle réduit soit à l'image de la réalité :

1. Similitude géométrique.
2. Similitude cinématique : les vitesses doivent être homologues entre modèle et réalité,
3. Similitude dynamique : Les rapports des forces doivent être les mêmes pour le modèle et la réalité.

Le respect des nombres adimensionnels de Reynolds et de Froude garantit la similitude des écoulements hydrauliques. Ils s'expriment par :

$$\mathcal{R} = \frac{\rho U h}{\mu} \dots\dots\dots (1-1)$$

et

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \dots\dots\dots(1-2)$$

La signification des symboles est détaillée au début de ce travail.

Le nombre de Reynolds traduit le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité alors que le nombre de Froude rend compte du rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur.

La conservation de ces deux nombres n'est cependant possible que pour un rapport des échelles de 1... ce qui limite grandement l'intérêt du modèle "réduit". Cependant, pour un nombre de Reynolds supérieur à 1 000, la turbulence est largement développée, et il est possible de négliger les forces de viscosité. On peut alors utiliser une échelle réduite pour le modèle en respectant la similitude de Froude. Ce raisonnement n'est évidemment valable que dans le cas d'un écoulement à surface libre fortement turbulent. Dans d'autres domaines, la similitude sera réalisée par rapport au nombre de Reynolds.

Si r est le rapport des échelles géométriques, et que l'indice n correspond à la nature et l'indice m au modèle, on a alors les relations :

longueur	L_m/L_n	= r
vitesse	V_m/V_n	= $r^{1/2}$
temps	T_m/T_n	= $r^{1/2}$
surface	A_m/A_n	= r^2
volume	V_m/V_n	= r^3
pression	P_m/P_n	= r
forces	F_m/F_n	= r^3

Dans le cas du transport solide, les connaissances sont nettement plus sommaires, et la similitude ne peut alors être établie sur des bases théoriques. On considère généralement que le respect des règles précédentes suffit à assurer une bonne similitude des phénomènes.

Des difficultés sont aussi liées au fonctionnement du modèle. En effet, il est impossible de représenter les éléments les plus fins participant au charriage car, après réduction par le facteur d'échelle, la cohésion devient une caractéristique prépondérante de leur comportement.

Ainsi, on "coupe" généralement la courbe granulométrique pour les éléments de taille inférieure à 0.2 mm ce qui revient - pour un rapport d'échelle de 1/100 - à remplacer les éléments de moins de 20 mm par des éléments plus grossiers. Or, l'effet des éléments fins sur le transport solide n'est pas connu, mais il semble qu'une faible proportion d'éléments fins favorise le transport solide.

De plus, le modèle physique est sensible aux sollicitations auquel il est soumis. Ainsi, le choix du débit liquide, du débit solide, de la granulométrie injectée et celle déposée initialement dans le lit influence directement les résultats. Or le choix de ces paramètres dépend généralement d'autres études sur modèles réduits. Si ces choix sont peu importants durant les périodes de très fortes crues (le transport solide est relativement bien connu et assez "puissant" pour être peu sensible aux conditions expérimentales), il n'en est rien des périodes correspondant à un écoulement plus réduit.

Il est donc nécessaire de réaliser un calage du modèle. Cet aspect est détaillé au paragraphe 6.2.2.

Cependant, le modèle réduit est un outil de tout premier ordre, non seulement dans le cadre du dimensionnement d'ouvrages, mais aussi pour la recherche. C'est lui en effet qui permet de suivre l'évolution des processus au cours d'une crue.

De plus, sa souplesse permet de faire des études de sensibilité en modifiant les paramètres. D'autre part, les mesures en laboratoires sont beaucoup plus faciles que sur le terrain et permettent un suivi extrêmement fin des phénomènes. Ainsi, le modèle réduit est actuellement le principal outil de recherche utilisé en hydraulique torrentielle.

3.3.2. Mesure des granulométries

Il s'agit, dans ce paragraphe, de détailler les différentes mesures de granulométrie qui ont été adoptés au cours de ce travail et d'expliquer la méthode retenue pour chaque type de mesure.

Les essais en canal de largeur réduite (chapitre 4) ont fait l'objet de calculs basés sur l'hypothèse d'une couche active de granulométrie homogène. Cette démarche est détaillée dans ce paragraphe.

3.3.2.1. Granulométrie de base

La granulométrie de baseth est celle de l'ensemble des matériaux servant à l'essai. Elle est déterminée directement par tamisage. Sa détermination ne pose donc, *a priori*, aucun problème. Les mesures sont classiquement réalisées par tamisage d'échantillons d'environ 1 kg.

Cependant, la figure 3-19 est établie à partir d'échantillons du même matériau. La courbe de l'échantillon 3, un peu à l'écart, correspond à un prélèvement réalisé quelques heures après les deux premiers. Cet écart montre qu'un matériau de granulométrie très étendue ($d_{90}/d_{30} \approx 8$) opère naturellement un tri granulométrique au moindre mouvement. Ainsi, tous les prélèvements étaient réalisés après humidification du matériau afin de limiter ce tri. Il convient cependant d'être extrêmement prudent lors de la manipulation de ces produits.

D'autre part, les essais réalisés ici ont utilisé des matériaux issus d'essais industriels. Ils n'ont donc pas une granulométrie très homogène car ils proviennent de zones différentes.

De plus, la granulométrie est une "semi - variable" des essais industriels : la composition des matériaux est ajustée de façon à obtenir des essais satisfaisants. Or, il est difficile d'obtenir des mélanges homogènes sur plusieurs m³ de matériaux. La figure suivante montre les variations des résultats obtenus avec différents échantillons prélevés dans un matériau non mélangé.

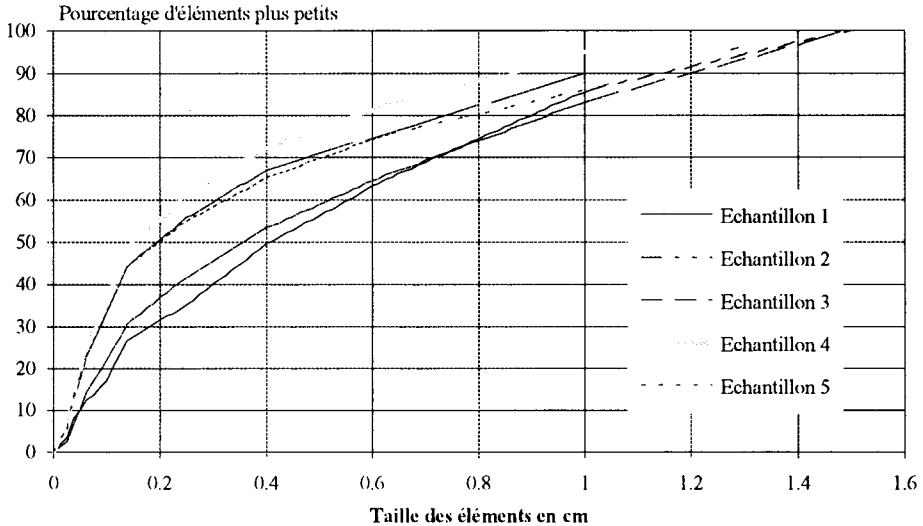


Figure 3-18 : Confrontation de plusieurs relevés granulométriques de la granulométrie de base du modèle sans mélange préalable (essais en canal étroit).

La dispersion est importante, et il n'est pas admissible de considérer qu'il s'agit d'une erreur liée à la mesure mais plutôt que c'est le résultat d'une hétérogénéité de l'échantillon initial comme le montrent les courbes suivantes, obtenues après homogénéisation :

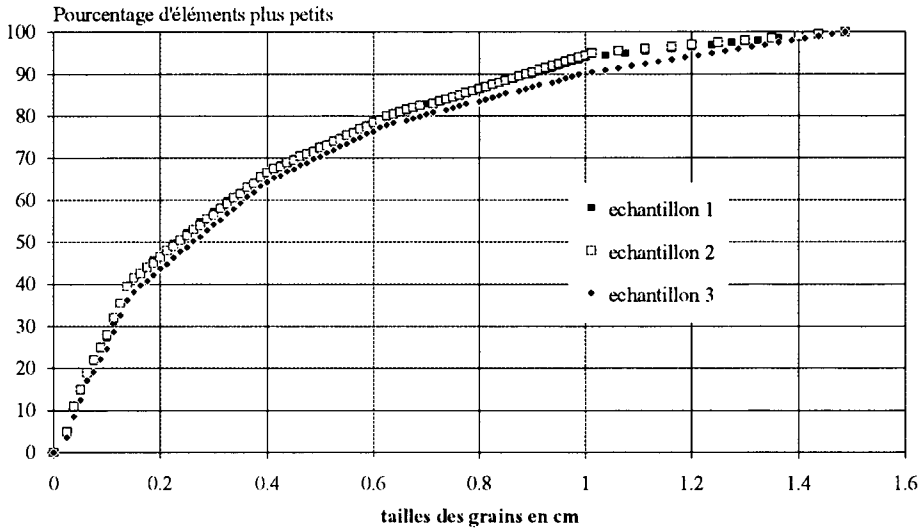


Figure 3-19 : Mesures granulométriques après mélange à la bétonnière du matériau de base (essais en canal de 60 cm de large)

Le graphique 3-18 montre cependant qu'il n'est pas satisfaisant de considérer que l'on utilise exactement la même granulométrie pour tous les essais. Celle ci sera donc recalculée pour chaque essai suivant la méthode exposée au paragraphe 3.2.4.4.

3.3.2.2. Granulométrie de surface mesurée directement

Dans le cadre d'une étude sur le tri granulométrique, il est nécessaire de définir la granulométrie du lit. On a vu en effet au chapitre précédent qu'il existait un écart important entre la mobilité des éléments dans le lit et celle des éléments sur le lit. De même, la mesure de granulométrie n'a de sens que si elle permet de différencier les deux dispositions.

Un autre problème, d'ordre pratique, est qu'il est impossible d'effectuer des mesures des éléments du lit durant le transport solide. Ainsi, les mesures directes ne concernent que le lit après les écoulements. D'autre part, pour connaître la signification des mesures, le débit a toujours été arrêté lorsque le transport solide était marginal. Cette approche, forcément plus restrictive, présente l'avantage de lever toute ambiguïté.

Finalement, deux méthodes ont été employées pour obtenir les courbes granulométriques du lit :

- la photographie du lit, qui a l'avantage de permettre un contrôle non destructif du lit et qui a été réalisée systématiquement,
- le prélèvement superficiel suivi d'un tamisage qui a été effectué pour vérifier la validité de la première méthode. La figure 3.5 montre en effet une bonne concordance entre les deux mesures.

Cette mesure de la granulométrie finale du lit est importante car elle est à la base du calcul de l'évolution granulométrique du lit comme exposé au chapitre suivant. La

figure suivante compare les mesures réalisées sur le lit en fin d'essai avec la granulométrie de base :

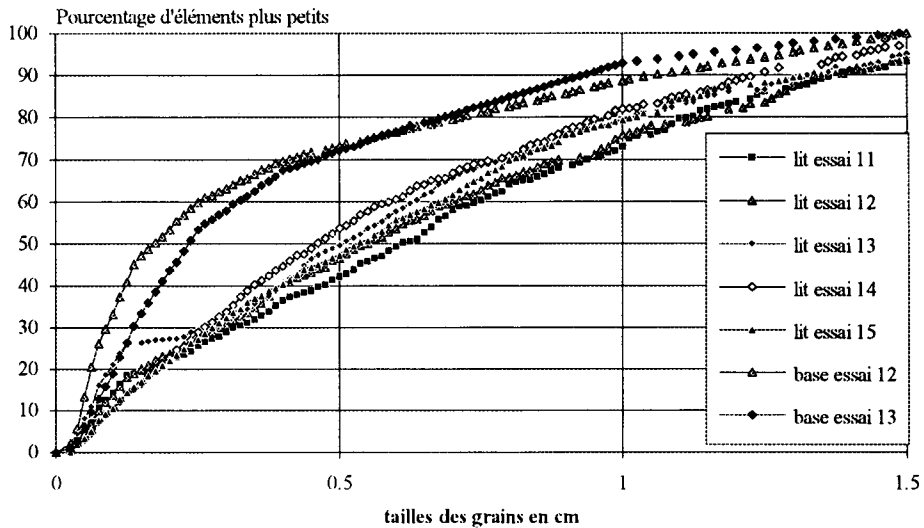


Figure 3-20 : Confrontation des mesures de granulométrie de base et du lit après pavage dans le cas des essais en canal d'un mètre de long.

Malgré l'importante dispersion, il apparaît nettement une différence tranchée entre les deux familles de granulométrie. Il faut noter qu'il s'agit d'essais correspondant à des conditions hydrauliques différentes.

3.3.2.3. Granulométrie transportée

Le terme de "granulométrie transportée" désigne ici - par un abus de langage - la granulométrie des matériaux transportés par l'écoulement et recueillis à la sortie du modèle. Il faut donc la distinguer de la granulométrie de la couche de transport (grains se déplaçant à la surface du lit) à cause de la différence de vitesse des grains en fonction de leur taille.

Dans le cas du modèle réduit, la mesure de la granulométrie transportée est particulièrement facile : il suffit de recueillir les matériaux à l'aval du modèle, de les sécher et de les tamiser. Il n'y a donc ni problème pratique ni difficulté théorique pour effectuer cette mesure.

Dans le cadre de ces essais cependant, pour obtenir des valeurs indépendantes des fluctuations de transport solide, les prélèvements étaient constitués de volumes assez importants (plusieurs kg). Il fallait alors effectuer un prélèvement pour ne tamiser qu'une masse réduite. La difficulté - réelle - est d'éviter toute ségrégation granulométrique pendant cette opération.

3.3.3. Obtention de la granulométrie durant l'écoulement en utilisant le concept de couche active

3.3.3.1. Objectif

On a vu que seule la mesure de la granulométrie finale du lit est possible. Or, dans le cadre des essais en canal étroit définis au chapitre suivant, il est indispensable de connaître à chaque instant la granulométrie du lit pour calculer la mobilité des grains. Il n'est possible de connaître cette granulométrie qu'en couplant l'équation de continuité avec une hypothèse de couche active qui est détaillée ici.

Les approches théoriques ainsi que les considérations sur la physique des phénomènes rencontrés dans ces essais ont été regroupés ci dessous afin de proposer une approche cohérente du calcul de la granulométrie de la surface du lit. En effet, la méthode retenue ici est essentiellement destinée à calculer la granulométrie de surface du lit et non à améliorer directement la connaissance des phénomènes de transport solide.

Ce regroupement nécessite de faire référence à des observations qui sont abordées au chapitre suivant. Le lecteur voudra bien nous en excuser.

3.3.3.2. Théorie de la couche active

Il est évident, qu'en règle générale, la couche d'éléments en contact avec l'écoulement est plus grossière que les couches profondes. Cette constatation a conduit à faire l'hypothèse que le lit était constitué d'une couche dans laquelle s'effectuent les échanges de matériaux entre le lit et l'écoulement. Ainsi, SIMON (1986) considère qu'avec une

"granulométrie non uniforme, l'introduction du concept de couche active devient indispensable : elle définit en effet le volume de contrôle au sein duquel la composition granulométrique du fond va se modifier"

Etudiant la conception d'un modèle sédimentologique, SIMON montre que le choix d'une épaisseur pour cette couche est important mais difficile. Elle considère, dans le cas des rivières, que l'épaisseur de cette couche est égale à la moitié de la hauteur des dunes. D'autre part, elle indique que cette épaisseur varie directement en fonction de la "puissance de l'écoulement". D'autre part, il semble préférable d'opter pour une couche active d'épaisseur non nulle (il y a un fort consensus pour considérer le d_{90}) lorsque le lit est pavé.

Ainsi, MOHAMEF ABDALLA SHARFI (1986) propose de relier directement l'épaisseur de la couche active au diamètre des grains. Son étude concerne les rivières à faible pente telles que le tiers central du Rhône. Il retient finalement :

$$E = \beta d_{90} \dots\dots\dots (3-5)$$

avec β compris entre 1 et 3. Il considère que, dans tous les cas, l'épaisseur de la couche active doit être supérieure aux plus gros grains. Il précise que cette épaisseur est très importante quand U_* est élevée. Il considère cependant qu'il s'agit d'un concept encore très mal connu.

L'importance de la contrainte de cisaillement - ou de la vitesse de friction U_* - a été directement mise en évidence par KARIM (1981) qui propose la formule :

$$E = d_{50} \frac{U_*}{U_{*c}} \dots \dots \dots (3-6)$$

U_{*c} correspond à la contrainte critique de cisaillement.

KARIM & KENNEDY (1986), RAHUEL (1988), toujours en considérant des dunes dans le cadre d'un modèle numérique, proposent de prendre une couche active (que RAHUEL appelle *couche mélangée*) d'épaisseur proportionnelle à la hauteur d'eau dans le bief c'est à dire à la hauteur des dunes.

BORAH & al. (1982) ont une approche plus réductrice du phénomène. Ils considèrent que la couche pavée est un état asymptotique du pavage. Ainsi, son épaisseur initiale est suffisante pour contenir assez de grains "intransportables" pour couvrir - *in fine* - toute la surface du lit. Ils en déduisent l'épaisseur "initiale" en fonction de la granulométrie de masse :

$$E = \frac{L}{L-p} \frac{d_1}{\sum_{k=1}^{\infty} f_k} \dots \dots \dots (3-7)$$

- E épaisseur de la couche active
- L fraction correspondant à la classe des plus petits éléments intransportables.
- d_1 taille des plus petits éléments intransportables

Cette approche règle le problème des échanges entre le lit profond et la couche active mais semble peu en rapport avec la réalité physique. De plus, la notion de grain intransportable est critiquable dans les écoulements à forte pente.

En retenant la définition généralement admise pour la couche active (grains en contact avec l'écoulement), il persiste un problème spécifique pour son dimensionnement aux fortes pentes : il n'y pas de dunes lorsque le nombre de Froude s'approche de l'unité.

- Dans le cas d'antidunes, la définition de la couche active est facile : c'est la moitié de leur hauteur. Cela correspond en effet au volume mis en mouvement par l'écoulement. Cette proportion se justifie par la forme régulière et symétrique des antidunes. Mais les connaissances de ces phénomènes sont vraiment embryonnaires. Ainsi, LARRAS (1972) cite un grand nombre de formules et d'expérimentations concernant les dunes. Au sujet des antidunes, il déclare seulement :

" les données correspondantes qu'on relève dans la littérature vont de 0.48 à 1.77 m pour la longueur d'onde, et de 3 à 9 cm pour la hauteur de crête à crête (...). Mais il s'agit là de valeurs correspondant exclusivement à des essais de laboratoire, et le fond de certains torrents, en nature, comporte des "fosses mobiles" allant à contre courant dont les caractéristiques dépassent visiblement ces chiffres."

Il n'est évidemment pas facile d'établir une relation à partir de telles indications.

- Dans le cas d'un lit plat de transition, le problème est encore plus ardu. En effet, il n'y a plus de structure facilement observable, mais il apparaît que les matériaux sur

une épaisseur de quelques centimètres sont remaniés fréquemment par l'écoulement. Ainsi, la couche active doit avoir une épaisseur de cet ordre.

Finalement - dans le cadre de ces essais - il paraît impossible de rattacher directement l'épaisseur de la couche active aux structures se déplaçant sur le fond du lit. D'autre part, l'hypothèse d'une couche active d'épaisseur constante est sans rapport avec l'observation des essais et difficilement acceptable. Il s'agit donc de trouver un paramètre explicatif des variations de cette épaisseur.

3.3.3.3. Paramètre explicatif des variations de la couche active

Dans le cadre de ces essais, on observe que la zone affectée par l'écoulement est plus épaisse au début de l'essai qu'à la fin. Il semble en effet que l'épaisseur de la couche active ne dépasse jamais 15 mm une fois le lit formé, mais qu'elle est comprise entre 20 et 30 mm dans la première phase de l'essai, en particulier à cause du déplacement d'amas de matériaux et de la propagation d'antidunes.

Il est donc nécessaire pour obtenir une évolution plus réaliste de la granulométrie du lit, de prendre en considération une épaisseur variable. La difficulté est de trouver un critère lié à cette épaisseur ainsi que d'en déterminer la loi d'évolution.

Le débit solide semble en être un bon indicateur : il semble en effet que l'épaisseur de la couche active augmente avec le débit solide. D'autre part, le débit solide est le principal paramètre expliquant la hauteur de la couche de matériaux transportés comme l'ont montré SMART & JAEGGI (1983) ET LARSEN (1990). Or, il est probable que l'épaisseur de la couche active et celle de la couche des matériaux transportés évoluent de concert.

Cette formulation présente cependant un inconvénient : en faisant intervenir le débit solide dans le calcul de la couche active donc de la granulométrie du lit, on complique considérablement, par la suite toute modélisation et l'écriture d'un modèle prédictif. Cependant, aucun autre paramètre n'est assez pertinent pour pouvoir remplacer le débit solide⁸. La hauteur d'eau, pendant les phases de fort transport est beaucoup trop variable pour pouvoir être utilisée directement. D'autre part, le débit liquide n'est pas un paramètre explicatif de l'épaisseur de la couche active.

Reste à trouver la forme de l'évolution de l'épaisseur de la couche active en fonction du transport solide. Le seul moyen semble être de faire des hypothèses puis de déterminer la plus crédible. Certains critères permettront de rejeter des hypothèses :

- A. obtention d'une classe granulométrique de masse négative ou nulle,
- B. diminution de masse de la couche active supérieure à la masse érodée dans le lit : on considère que, dans tous les cas, la sous couche est homogène et possède la

⁸ La granulométrie du lit est sans doute un bon paramètre explicatif. Cependant, il n'est pas souhaitable de l'utiliser pour calculer l'épaisseur de la couche active car celle-ci est fondamentale dans le calcul de la granulométrie. On risque alors d'introduire une instabilité artificielle, issue de l'interdépendance mathématique de deux paramètres.

même granulométrie que le matériau de base. Il ne peut donc y avoir un transfert de matériaux grossiers vers la couche profonde du lit⁹.

Dans tous les cas, il apparaît que pour un débit solide nul ou très faible, la couche active garde une épaisseur de l'ordre du d_{90} : c'est celle que l'on peut observer à la fin de l'essai.

D'autre part, il est nécessaire pour avoir des résultats conformes aux observations et plus robustes de remplir les trois conditions suivantes :

- forte épaisseur de la couche active dans la phase de fort transport solide afin de réduire la dispersion considérable de la granulométrie du lit que l'on observe dans cette première phase.
- diminution très lente de cette épaisseur à la fin de l'essai afin que l'intégralité de cette réduction puisse s'expliquer par l'érosion dans le lit du modèle.
- épaisseur finale de la couche active inférieure à 2 cm en accord avec les observations réalisées pendant les essais.

Il semble que ces différents objectifs peuvent être atteints en considérant une variation de l'épaisseur de la couche active proportionnelle au carré du débit solide.

D'autre part, il s'agit de choisir le diamètre qui sert à adimensionnaliser cette quantité. En toute rigueur, il serait nécessaire de réaliser des expériences avec plusieurs granulométries distinctes, de déterminer si réellement il est correct d'adimensionnaliser l'épaisseur de la couche active par le d_{90} , puis finalement de déterminer quel matériau doit être utilisé pour le calcul de ce décile.

Cependant, il ne s'agit ici que d'une approximation destinée à calculer l'évolution de la granulométrie du lit et on ne dispose pas des mesures expérimentales permettant d'effectuer un choix. Il est d'autre part probable que le diamètre à utiliser ne soit pas le même pour l'épaisseur finale E_0 et pour le débit solide dimensionnel. Dans les deux cas, on prendra ici le d_{90} correspondant à la granulométrie de base.

On a alors :

$$E_* = \frac{E}{d_{90}} = \frac{E_0}{d_{90}} + \beta q_{s*}^2 \dots \dots \dots (3-8)$$

avec

E_* épaisseur de couche active adimensionnelle

β coefficient de calage permettant de prédéterminer l'épaisseur maximum de la couche active.

$$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)gd^3}} \text{ débit solide adimensionnel.}$$

D'autres expressions ont été testées pour exprimer cette relation (en particulier en considérant une relation linéaire ou logarithmique entre débit solide et variation

⁹ On se place évidemment dans une situation très différente d'un modèle numérique destiné à reproduire l'évolution à long terme d'une rivière. Ici, le phénomène largement prépondérant est l'érosion, et il n'est pas envisagé - ni observé - de prendre en compte les dépôts à long terme dans le lit.

d'épaisseur de la couche active). Il est nettement apparu que la forme parabolique, avec une faible variation de l'épaisseur pour un transport solide réduit, était la mieux adaptée.

A partir de simulation en considérant les conditions A et B, il est apparu que l'on pouvait retenir les valeurs suivantes :

$$d_{90} < E_0 < 1.5 d_{90}$$

et

$\beta = 75.6$ ce qui aboutit à une épaisseur maximum de 30 mm en accord avec les observations.

Or, les simulations réalisées ultérieurement ont montré que l'écart introduit en prenant E_0 égal à une ou une fois et demie le d_{90} n'était pas important au niveau du résultat. Le choix de $1.5 d_{90}$ semble donc être préférable car il limite l'influence d'une formulation empirique tout en fournissant une évolution de la granulométrie du lit conforme aux observations. On obtient finalement :

$$E_* = 1.5 + 75.6 q_*^2 \dots\dots\dots (3-9)$$

Cependant, certains calculs seront aussi réalisés avec :

$$E_* = 1 + 75.6 q_*^2 \dots\dots\dots (3-10)$$

afin d'étudier la sensibilité des résultats aux hypothèses sur l'épaisseur de la couche active.

3.3.3.4. Méthode de calcul de la granulométrie de base

On a vu précédemment que la granulométrie de base était difficile à mesurer de façon précise à cause de l'hétérogénéité (relative) du matériau utilisé durant les essais. Or, l'hypothèse de la couche active permet de calculer la granulométrie de base avec une grande précision. En effet, plutôt que d'utiliser une seule mesure dans un matériau relativement hétérogène, il est possible de regrouper l'ensemble des mesures réalisées durant un essai et d'en déduire la granulométrie de base qui a servi durant cet essai.

Le schéma suivant correspond aux échanges réalisés par la couche active durant les essais en canal étroit. On note :

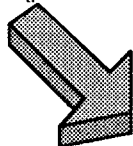
f_i fréquence de la classe i

M Masse totale.

Pour le lit, on ne prend en considération que les matériaux transmis à la couche active durant les essais, les autres ne jouant aucun rôle dans les processus hydrauliques.

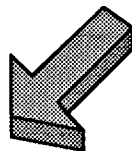
apport amont (indice a)
(granulométrie de base)

$$f_{ai} = f_{bi} - M_a$$



apport venant du lit (indice b)
(granulométrie de base)

$$f_{bi} - M_l$$



couche active de granulométrie et de masse connue

(indice c)

(la masse est connue si l'on connaît l'épaisseur)

$$f_{ci} - M_c$$



matériaux sortis du canal de masse et de granulométrie connue.

(indice s)

$$f_{si} - M_s$$

L'épaisseur de la couche active étant la même au début et à la fin de l'essai¹⁰ ($q_{s*} \approx 0$), on sait déjà par application de l'équation de continuité que :

$$M_a + M_l = M_s \dots\dots\dots(3-11)$$

En écrivant l'équation de continuité pour chaque classe granulométrique i on obtient alors :

$$M_a f_{bi} + M_l f_{bi} + M_c f_{bi} = M_c f_{ci} + M_s f_{si} \dots\dots\dots(3-12)$$

$M_c f_{bi}$ correspond à l'état initial de la couche active, constituée de matériau de base.

En combinant les deux équations précédentes, on obtient finalement pour chaque classe granulométrique i :

$$f_{bi} = \frac{M_c f_{ci} + M_s f_{si}}{M_c + M_s} \dots\dots\dots(3-13)$$

Or, dans le membre de droite, tout est connu, M_c étant le produit de la surface du lit¹¹, par la densité du matériau et l'épaisseur de la couche active alors que f_{ci} , granulométrie du lit, est déterminée systématiquement par mesure des longueurs sur photographie à la fin des essais.

La précision sur la granulométrie du lit est alors excellente. La figure suivante compare les granulométries obtenues par cette méthode avec celles mesurées directement :

¹⁰ Dans le cas d'un essai de dépavage, les équations sont exactement les mêmes, mais il y a alors une variation d'épaisseur de la couche active qui est connue. Il n'y a aucune difficulté à l'introduire dans ces équations.

¹¹ L'avantage d'un écoulement monodimensionnel pour le traitement des données apparaît alors dans toute son ampleur. En effet, lorsque l'écoulement divague, il dépose des paquets de granulométrie resserrée en dehors de la zone d'écoulement finale, la notion de couche superficielle homogène disparaît et toutes les équations précédentes deviennent inutilisables.

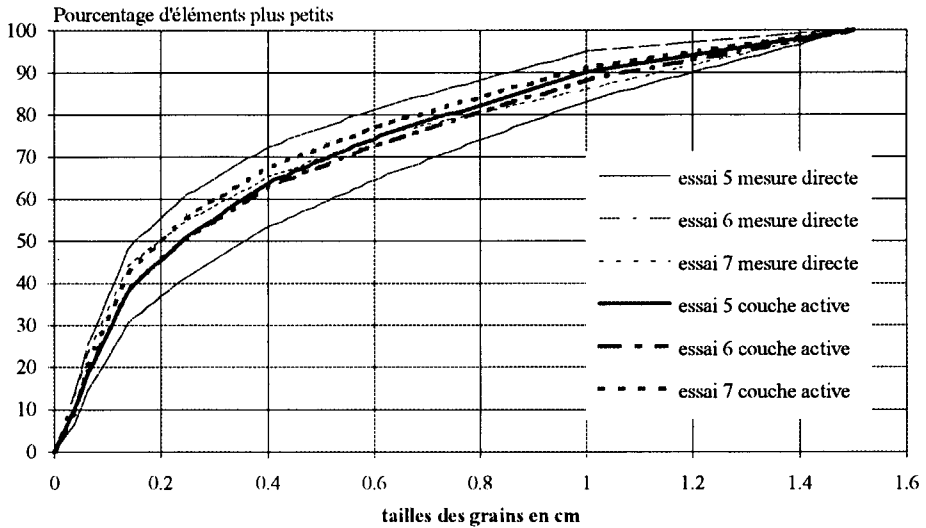


Figure 3-21 : Comparaison des mesures directes de la granulométrie de base (traits fins) avec la granulométrie de base calculée par l'hypothèse de la couche active.

Les valeurs obtenues pour la granulométrie de base sont parfaitement cohérentes avec les mesures réalisées sur les matériaux sortant du canal. Elle permet donc de réduire l'influence des erreurs de mesure lors du traitement global d'un essai. C'est ce qui est réalisé pour déterminer l'évolution de la granulométrie du lit.

3.3.3.5. Méthode de calcul de l'évolution granulométrique de la surface du lit

Le principal intérêt de cette hypothèse de couche active est la détermination de la granulométrie du lit durant les phases de très fort transport solide. La méthode employée est la même qu'au paragraphe précédent, mais le calcul est effectué à chaque pas de temps. Le schéma global reste le même, et les notations sont conservées. Ce calcul est réalisé en calculant la somme des matériaux qui ont déjà transité dans le modèle à chaque pas de temps.

Pour le $t^{\text{ième}}$ prélèvement¹² et pour chaque classe granulométrique l'équation de continuité s'écrit en considérant la couche active :

$$M_c(q_{s*}(t)) f_{ci}(t) = M_c(0) f_{bi} + \sum_{j=1}^t (\delta M_l(j) + \delta M_a(j)) f_{bi} - \sum_{j=1}^t \delta M_s(j) f_{si}(j) \dots\dots\dots (3-14)$$

¹² Ici, t n'est pas le temps à proprement parler, mais un indice discret correspondant à chaque prélèvement. Pour écrire les mêmes équations avec le temps - comme variable continue - il faudrait considérer que des mesures sont réalisées en continu. Cette hypothèse n'est pas admissible ici, car au début de la phase de formation du lit, l'évolution entre deux prélèvements est trop importante.

La notation $\delta M(t)$ correspond au volume solide échangé durant la période correspondant au prélèvement t .

En sommant sur l'ensemble des classes granulométriques, on obtient :

$$M_c(q_{s^*}(t)) = M_c(0) + \sum_{j=1}^t (\delta M_1(j) + \delta M_s(j)) - \sum_{j=1}^t \delta M_s(j) \dots\dots\dots (3-15)$$

En effectuant la différence entre le pas de temps t et le pas de temps $t-1$ on écrit :

$$\delta M_1(t) + \delta M_a(t) = (M_c(q_{s^*}(t)) - M_c(q_{s^*}(t-1))) + \delta M_s(t) \dots\dots\dots (3-16)$$

En utilisant d'abord cette équation concernant l'ensemble des classes granulométriques, puis l'équation (3-14), on peut calculer, à chaque pas de temps, l'évolution de la granulométrie du lit. Il faut connaître le débit solide, ce qui n'est pas un obstacle au traitement des essais, mais qui rend le calcul plus difficile dans le cadre d'un modèle prédictif.

La figure suivante montre le résultat d'un tel calcul :

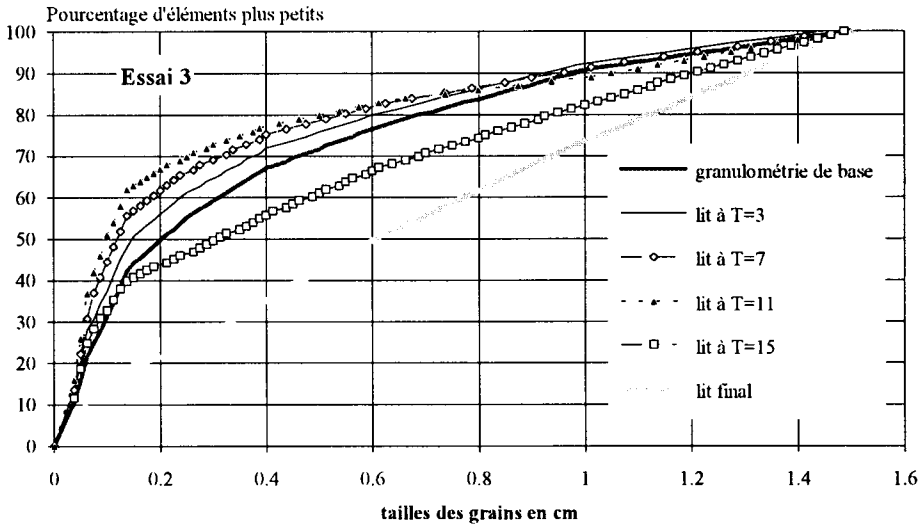


Figure 3-22 : Evolution de la granulométrie du lit pour l'essai 3 avec une épaisseur finale de la couche active de $1.5 d_{90}$.

3.3.4. Mesure de la pente du lit

La mesure de la pente a été réalisée de deux manières suivant la configuration du modèle :

1. Pour le modèle étroit (10 cm de large), des échelles limnimétriques ont été disposées tous les 20 cm de chaque côté du canal. Les relevés des niveaux du lit à l'amont et à l'aval de chaque échelle étaient réalisés. Il y avait donc 4 relevés pour chaque abscisse ce qui permettait de réduire les incertitudes en calculant la moyenne des quatre valeurs. En effet, les graduations correspondaient à 1 mm, mais le passage d'antidunes puis la formation de seuils peut faire varier d'au moins 10 mm le niveau ponctuel du lit. La prise en considération de quatre mesures

permet de réduire l'incertitude. La figure suivante montre l'évolution du profil en long au cours du temps.

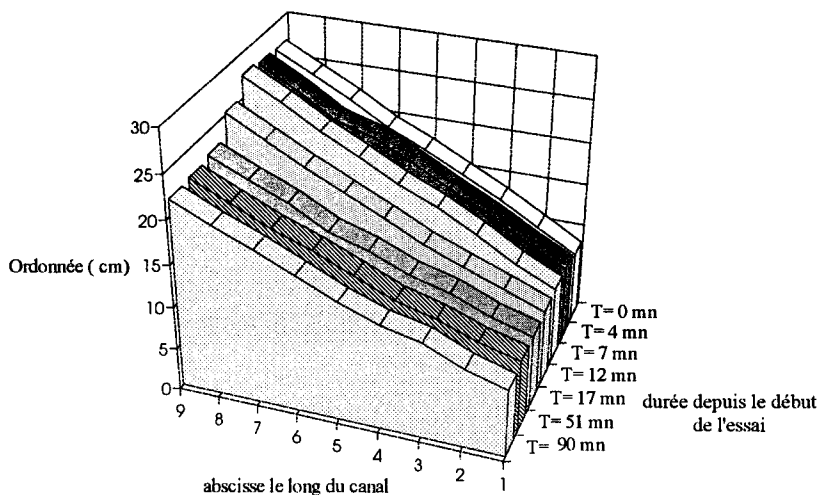


Figure 3-23 : Evolution du profil en long au cours de l'essai 4.

Il apparaît qu'il n'y a pas de concavité marquée ni d'anomalie de mesure flagrante. La restriction de la mesure du profil en long à la pente moyenne n'est donc pas une perte d'information importante.

On majore l'erreur en considérant que l'erreur de mesure en un point (moyenne des quatre mesures réalisées) est de 5 mm. Dans ce cas, l'erreur sur la pente moyenne est de 0.25% pour une longueur de canal de 2 m et de 0.5 % pour une longueur d'un mètre. Rapportée à une pente initiale de 12 %, cette incertitude est tout à fait acceptable.

2. Dans le cas d'un écoulement non contraint latéralement, les mesures sont beaucoup plus sommaires. Le niveau de la surface a été mesuré sur une dizaine de transects au-dessus du bras principal. Ces mesures n'étaient pas assez précises pour faire apparaître une variation du profil en long.

En effet, la mesure d'une telle évolution dans le cadre d'un écoulement divaguant est difficile car il faudrait construire le profil le long d'une abscisse curviligne suivant l'écoulement. De plus, il serait nécessaire de distinguer chaque bras.

Enfin, seule la pente moyenne a été mesurée.

3.3.5. Mesure des conditions hydrauliques

Il est nécessaire de connaître les conditions hydrauliques⁴ appliquées au matériau pour en expliquer l'évolution. Si la mesure du débit total est une mesure classique, celles de la hauteur d'eau et de la vitesse dans un écoulement de moins de 10 mm de hauteur posent plus de difficultés, surtout quand la submersion relative (h/d_{90}) est de l'ordre de 1. Il n'est en effet pas possible de mesurer la hauteur avec une précision acceptable. La démarche retenue est la suivante :

1. mesure directe de la vitesse,
2. calcul de la hauteur connaissant le débit et la largeur d'écoulement.

3.3.5.1. Débit

La plate-forme torrentielle utilisée est dotée d'un système d'asservissement du débit. Il suffit donc de programmer le débit désiré en fonction du temps pour que celui ci soit appliqué avec une précision d'environ 3 %. Cette précision dépend du débit mais est aussi limitée par le programmeur. En effet, avec l'appareillage utilisé, le pas de programmation du débit était de 0.033 l/s.

Cependant, ces valeurs ne sont valables qu'en régime permanent. Dans le cas de variations de débit, d'autres phénomènes s'ajoutent :

1. **réaction du programmeur à un changement de consigne.** C'est une source d'erreur importante car le temps d'ajustement du débit était d'environ une minute. C'est une source d'inertie bien supérieure à celle du circuit hydraulique en charge.
2. **laminage des variations de débit par le réservoir en tête de canal.** C'est une source d'inertie très importante. En effet, il n'a pas été possible d'éviter une zone de tranquillisation en tête du canal d'une surface de l'ordre d'un m². Si le passage du débit de 0.03 l/s à 0.5 l/s nécessite une élévation de 1 cm, le volume correspondant est de 10 l, soit 20 secondes d'écoulement. Or la réaction de ce type de réservoir suit une exponentielle et l'équilibre est atteint encore plus tardivement.

Il y a donc un écart probablement assez net lors des variations rapides de débit liquide. Or la mesure des écarts entre consigne et débit réel en écoulement transitoire est difficile à réaliser. Les hydrogrammes des essais ont donc été construits de façon à éviter les brusques variations de débits durant les mesures. Ainsi, on peut considérer que le débit entrant dans le modèle était connu avec une précision de 0.033 l/s.

Un autre aspect doit être pris en compte : c'est l'infiltration dans le modèle. En effet, le débit circulant à l'intérieur du matériau ne peut être considéré comme participant directement à l'écoulement. Des précautions ont été prises pour limiter ce phénomène. Ainsi, une couche de sable fin et peu perméable est située 10 cm sous la surface de l'écoulement afin de réduire la section disponible pour l'infiltration. Le débit s'écoulant dans le matériau était donc inférieur à 0.005 l/s au début des essais. Il a cependant triplé au cours des essais avec l'augmentation du nombre de fuites du canal. Mais il est toujours resté inférieur à 0.02 l/s ce qui est faible même pour les débits nominaux de 0.2 l/s.

3.3.5.2. Vitesse

La mesure de la vitesse, avec une hauteur d'eau de l'ordre du diamètre des plus gros éléments ne peut être réalisée ni par micro moulinet, ni par tube de PITOT, ni par suivi d'un corps flottant. Cette difficulté est d'autant plus grande que la concentration en matériaux est très forte durant une partie de ces essais. Il est donc indispensable de réaliser une mesure basée sur le suivi d'un nuage de sel dans l'écoulement. Le principe est le suivant :

On dispose dans l'écoulement deux paires d'électrodes. Après injection d'une solution saline en amont du dispositif, on mesure la conductivité au niveau de chaque paire d'électrodes. Il apparaît entre les deux courbes un décalage représentatif du temps de parcours du nuage de sel entre les deux capteurs. Il suffit de diviser la distance entre les paires d'électrodes par le décalage pour obtenir la vitesse de l'écoulement. Le principe de cette méthode est exposé à la figure suivante :

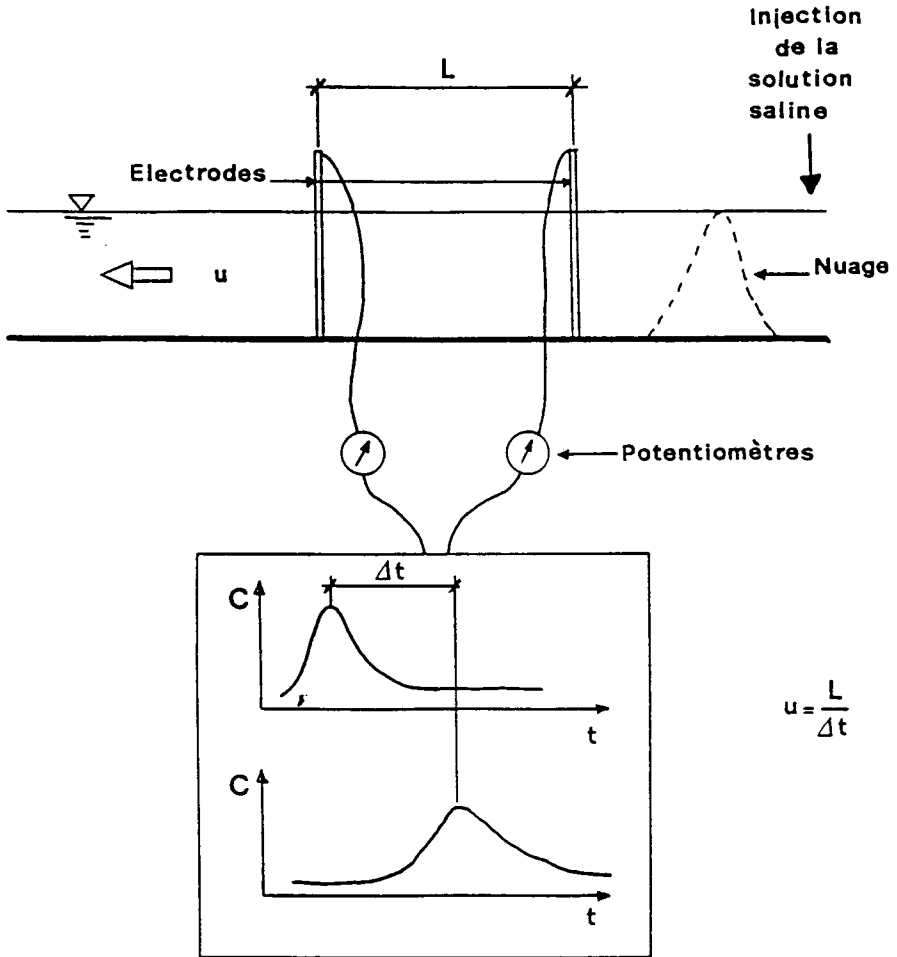


Figure 3-24 : Principe de la méthode du sel (d'après CAO 1985).

L'approche théorique dans le cadre d'une faible submersion relative est complexe à cause des zones d'eau morte et le modèle de FICK ne peut plus être utilisé. La difficulté est de définir le décalage entre deux nuages à partir de deux courbes.

CAO (1985) a réalisé une étude approfondie à ce sujet pour des fortes pentes et une faible submersion relative. Il en conclut que le calcul de la vitesse doit être basé sur l'intervalle de temps séparant les maxima des conductivités mesurées.

Pour une plus grande précision, le maximum d'une courbe a été considéré comme égal à la moyenne des conductivités supérieures à 95 % du maximum. Ce calcul permet de remédier à l'imprécision due à la discrétisation réalisée par la carte d'acquisition. La figure-ci dessous correspond à une mesure réalisée sur un canal de 60 cm de largeur.

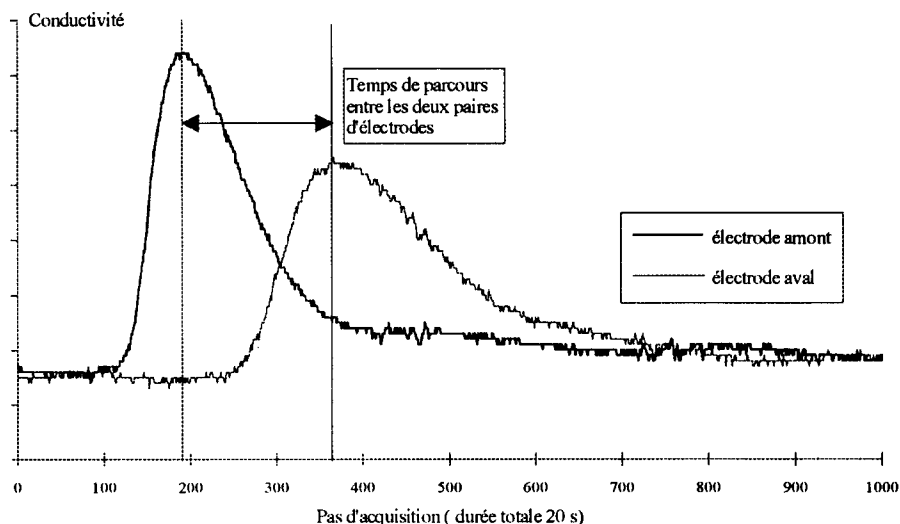


Figure 3-25 : Exemple de mesure de vitesse sur canal

Après essais, les conditions expérimentales conduisant aux meilleurs résultats sont les suivantes :

- injection de 15 cl de saumure saturée 20 cm en amont des premières électrodes,
- paires d'électrodes espacées de 80 cm,
- distances entre électrodes : 10 cm.

En fait, Il apparaît qu'à part des problèmes très concrets d'interférence électrique (pour des électrodes trop proches) et de programmation de la carte d'acquisition, la seule limitation de cette méthode est de faire une mesure assez rapide pour pouvoir réduire la dilution de la saumure et d'éviter que les zones d'eau morte n'influencent trop la mesure. Il est cependant indispensable d'effectuer un contrôle visuel des courbes en particulier pour éviter que la mesure soit faussée par des parasites.

Il n'a pas été possible de vérifier avec précision la validité de ces mesures. Cependant, il est apparu que l'ordre de grandeur était toujours le même que celui issu de mesures plus sommaires et que la reproductibilité des mesures est excellente.

Il faut noter qu'aucun effet du transport solide (même avec des concentrations supérieures à 200 g/l !) n'a pu être montré. Dans ce cas cependant, les fluctuations de vitesse réelle de l'écoulement en fonction de l'évolution des caractéristiques du lit rendent difficile la mise en évidence d'écart engendrés par le transport solide.

La figure suivante montre l'effet des variations de rugosité du lit directement engendrées par les instabilités du transport solide. Ces changements de rugosité

concernaient une longueur du canal imposée par le transport solide. Ainsi, suivant la distance entre les électrodes, ce phénomène peut être plus ou moins marqué. Dans le cadre des essais en canal étroit, c'était généralement l'ensemble du canal qui était concerné par un changement de rugosité. Mais, pour des mesures sur un modèle plus grand, il faut définir sur quelle partie du canal la vitesse doit être mesurée avant de placer les électrodes.

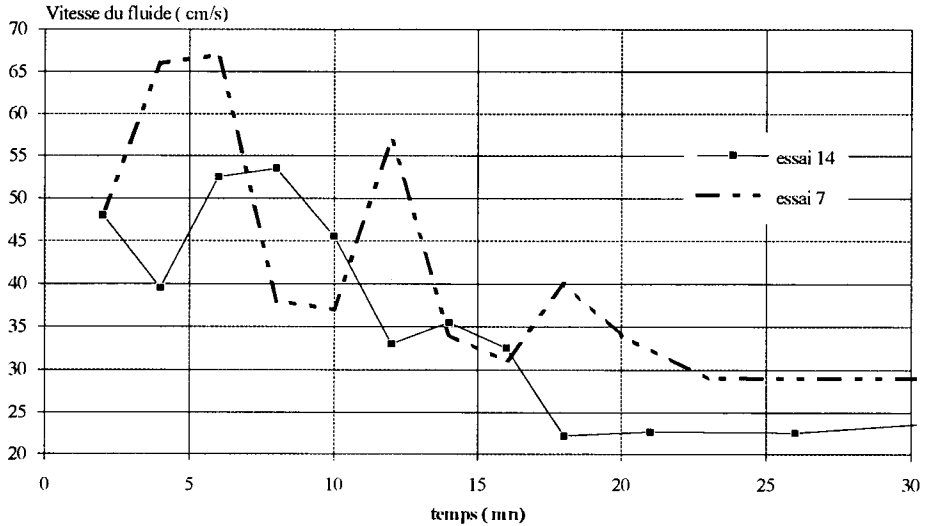


Figure 3-26 : Fluctuation de vitesse dans une période de fort transport solide

Ces mesures ont aussi été réalisées dans le cadre d'un écoulement non contraint. Dans ce cas, il est nécessaire de déplacer les électrodes de façon à suivre les divagations de l'écoulement. Il est apparu qu'aucune autre contrainte particulière n'était liée à ce type de mesure.

3.3.5.3. Hauteur

Connaissant le débit, la vitesse, et la largeur de l'écoulement, la hauteur d'eau s'obtient facilement par :

$$h = \frac{Q}{UB} \dots\dots\dots (3-17)$$

Un tel calcul ne peut être réalisé que dans le cas d'un écoulement parfaitement monodimensionnel¹³. Cette hypothèse est globalement admissible pour les essais en

¹³ En effet, lorsque l'écoulement a la possibilité de divaguer, la largeur au miroir peut être estimée avec une précision satisfaisante. Mais la profondeur et surtout la vitesse varient de façon importante dans la section. La "profondeur équivalente" que l'on obtiendrait en appliquant la formule précédente serait alors sans réelle signification et sans rapport avec le transport solide qui se produit essentiellement dans les zones les plus profondes.

canal étroit (10 cm) même avec le plus faible des débits nominaux. En effet, les mesures de vitesse sont réalisées sur une distance de 80 cm alors que les rares divagations observées se sont produites sur une longueur de l'ordre d'une dizaine de centimètres.

D'autre part, pour le calcul de la hauteur, on considère que l'écoulement est uniforme selon la largeur. Or, même pour un débit de 0.3 l/s, il apparaît un très faible méandrage. Le calcul est donc celui de la hauteur moyenne de l'écoulement : il revient à sous estimer la contrainte de cisaillement sur une partie du lit.

Cependant, même pour un débit de 0.2 l/s, il ne semble pas que le méandrage ait une influence notable sur les conditions d'écoulements.

D'autre part, dans les périodes de fort transport solide, la hauteur calculée à partir de la vitesse n'est pas la hauteur du mélange mais la hauteur d'eau fictive suivant les travaux de SMART & JAEGGI (1983). Or, d'après leurs travaux, le rapport hauteur du mélange / hauteur d'eau fictive pour une pente de 12 % et un fort transport solide est d'environ 1.25. Evidemment, lorsque le débit solide devient très faible, ce rapport se rapproche de 1. Il y a donc un écart d'au plus 20 % entre la hauteur du mélange et celle qui est calculée de cette façon. A partir de l'équation suivante, il est possible de connaître l'écart entre la hauteur du mélange et la hauteur d'eau fictive :

$$\frac{h_w}{h_m} = 1 - 1.41 I^{1.14} q_{s*}^{0.18} \dots\dots\dots(3-18)$$

On obtient, à partir des essais en canal étroit la figure suivante (en adimensionnalisant le débit solide par le d_{50} des éléments transportés) :

Effet du transport solide sur la hauteur d'eau

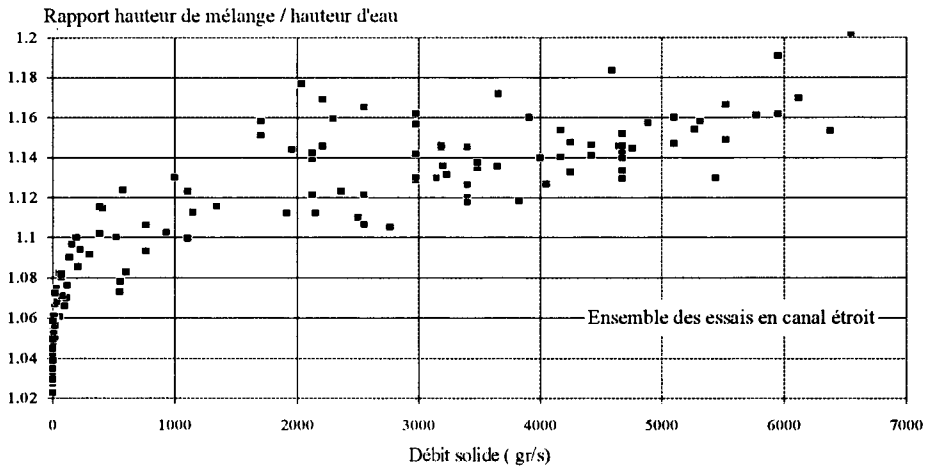


Figure 3-27 : Augmentation de la hauteur du mélange entraînée par le transport solide.

Cependant, ce phénomène a peu d'importance par rapport aux très fortes variations de vitesse - donc de hauteur - qui se produisent avec un fort transport solide. Ainsi, d'une mesure à l'autre, la hauteur peut varier dans un rapport de 1 à 2, ce qui est directement lié aux instabilités inhérentes au charriage torrentiel.

3.3.5.4. Largeur d'écoulement

Ce type de mesure ne se présente que dans le cas d'un canal assez large pour permettre les divagations. Ces mesures n'ont été réalisées que dans le cas du canal de 60 cm de large. En effet, le dessin en plan de l'écoulement sur le modèle de grande dimension est trop compliqué pour pouvoir exploiter directement ce type de mesure. D'autre part, cette mesure est relativement longue - par rapport à la vitesse de divagation en période de fort transport solide - et n'est possible qu'en fin d'essai lorsque le lit est immobile.

Les mesures ont donc été réalisées suivant des transects transversaux régulièrement espacés en distinguant chaque lit. La mesure correspond à la largeur au miroir pour le débit nominal de l'essai. Les berges présentant un profil irrégulier, la mesure ne permet pas une précision de moins d'un cm.

D'autre part, le lit comprend aussi des zones à très faible tirant d'eau où l'écoulement et le transport solide sont négligeables. Elles ont été considérées au même titre que les zones plus actives car il n'a pas été possible de définir de critère discriminant. Dans tous les cas, le lit principal est distingué des lits secondaires. Cette distinction présente quelquefois un caractère très arbitraire.

La figure suivante montre l'évolution des largeurs du lit en fonction de la situation longitudinale à la fin de l'essai 22 (dans ce cas il y a un lit principal et jusqu'à deux lit secondaires) :

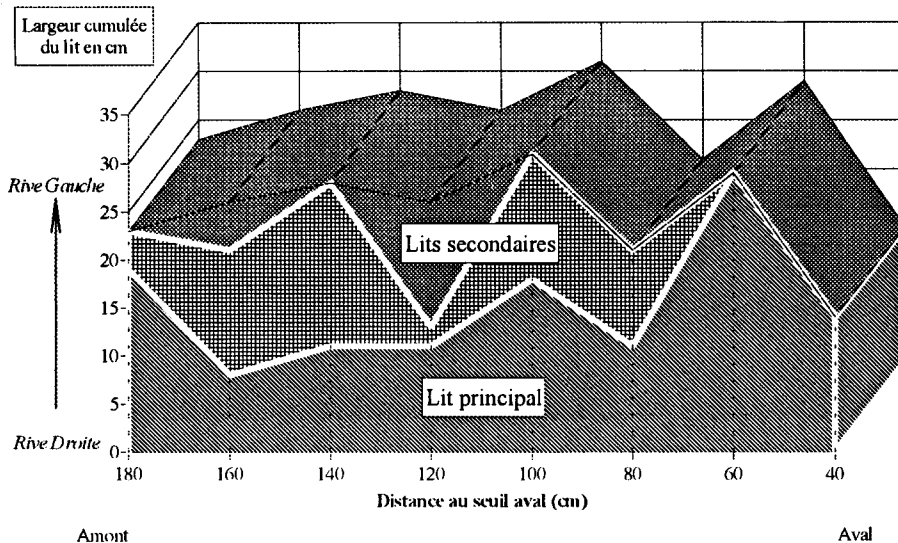


Figure 3-28 : Largeur des lits dans le cas d'un essai en canal de 60 cm de large¹⁴.

Il apparaît assez nettement qu'il n'y a pas de continuité et que les valeurs moyennes présentent un caractère artificiel. Ces mesures sont utilisées dans le chapitre 5.

3.3.6. Méthode de calcul des paramètres

Il s'agit ici d'énumérer les hypothèses retenues pour effectuer les calculs afin de mieux cerner leur validité. La principale difficulté consiste à regrouper des mesures réalisées à des instants différents alors que l'évolution des phénomènes au cours du temps ne peut être négligée.

Les conditions hydrauliques sont calculées à partir de trois paramètres mesurés sur le modèle :

- débit liquide,
- vitesse,
- pente.

En considérant que l'écoulement se produit uniformément sur toute la largeur, il est possible de calculer la hauteur d'eau, le nombre de Froude, la contrainte de cisaillement, les coefficients de perte de charge...

Le débit étant supposé connu en permanence, le calcul de ces paramètres n'est possible que lorsque pente et vitesse sont connues. Le premier paramètre évoluant relativement lentement, et le relevé du profil en long étant assez difficile, la pente n'est mesurée qu'une demi-douzaine de fois par essai. On fait donc l'hypothèse qu'entre deux mesures

¹⁴ Dans ce cas particulier, le lit principal était toujours en rive droite du modèle.

la pente varie linéairement en fonction du temps. En règle générale, ceci est très acceptable dans la mesure où il n'y a pas de différence importante entre deux mesures.

Enfin, une erreur importante provient de l'interpolation entre deux mesures de vitesse. En effet, les calculs sont réalisés au début et au centre de chaque prélèvement, ce qui représente en tout une trentaine de points. Or, en particulier dans la fin de la période de fort transport solide, les paramètres varient rapidement. Dans ce cas, les interpolations introduisent une erreur qui peut être significative dans certains cas.

Ainsi, durant tous les calculs, la hauteur et la vitesse ont été calculées par interpolation à partir des instants où une mesure avait été réalisée. La comparaison du débit (valeur exacte) au produit vitesse \times hauteur (ces deux derniers paramètres étant calculés par extrapolation) fournit une bonne idée des erreurs introduites par les interpolations.

Ce sont les essais en canal court qui présentent les plus fortes dispersions : cela n'a rien d'étonnant si l'on se rappelle que ce sont ceux qui évoluent le plus rapidement. Cependant, la moyenne du rapport est de 1.0026 alors que la variance est inférieure à 3×10^{-3} , ce qui rend ce type d'erreur tout à fait négligeable par rapport aux autres sources d'incertitude.

3.3.7. Correction de l'effet de paroi

Dans une section mouillée, la contrainte de cisaillement se répartit principalement sur le lit mais aussi sur les parois. Il est donc nécessaire de cerner la distribution des contraintes afin de calculer la contrainte de cisaillement réellement appliquée au lit.

Pour un tel calcul, on se base sur la méthode mise au point par EINSTEIN, classique pour aborder ce problème. On décompose d'abord la section en deux parties l'une liée au fond, l'autre à la paroi comme le montre le schéma suivant :

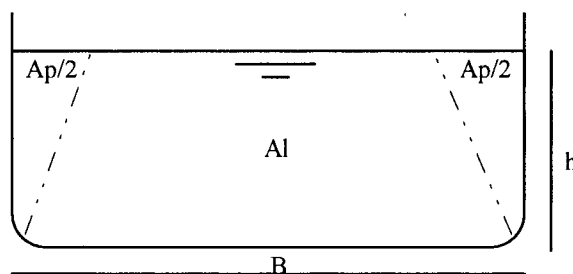


Figure 3-29 : Décomposition de la section mouillée pour le calcul de l'effet de paroi.

Selon cette hypothèse, on considère que vitesse et pente de la ligne d'énergie sont identiques dans chaque partie.

Les résultats de calculs correspondant à plusieurs hypothèses de rugosité et de hauteur d'eau sont reproduits dans le tableau suivant. Les caractères gras indiquent les changements par rapport aux chiffres du premier jeu de paramètres :

h (m)	0.01	0.01	0.005	0.02	0.05
B (m)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
K_{lit}	25	25	25	25	25
K_{paroi}	80	60	80	80	80
K_{global}	27	27	26	29	34
K calculé en négligeant les pertes au niveau des parois	28	28	27	31	40
<i>écart relatif</i>	<i>3%</i>	<i>4%</i>	<i>1%</i>	<i>7%</i>	<i>17%</i>

Il apparaît que la hauteur d'écoulement n'excédant pas 1.5 cm l'erreur introduite par l'effet des parois peut être considérée comme très faible. Or, l'influence des parois dans ce type d'expérience est mal connue et la validité des hypothèses d'Einstein est discutable. Ces résultats ne constituent donc qu'un ordre de grandeur de l'influence des parois.

Etant donnée la faiblesse des écarts, il semble tout à fait admissible de négliger l'effet des rugosités de la paroi sur l'écoulement.

3.4. Mesures de terrain

3.4.1. Difficulté de l'approche

Pour les mesures de terrain, les difficultés sont de toute autre nature. D'une part, les paramètres mesurés sont statiques : il ne s'agit plus de déterminer un débit ou une vitesse mais de quantifier les vestiges de phénomènes passés. En effet, les mesures similaires à celles réalisées sur modèle réduit ne peuvent être faites que sur des sites de bassins versants expérimentaux. Dans un tel cas les difficultés sont assez nombreuses pour expliquer qu'il n'existe en France aucun site correspondant à ce travail.

D'autre part, même pour les mesures statiques les difficultés sont importantes. On exclut de ce paragraphe le problème ardu de la signification des mesures par rapport à la dynamique du torrent.

La principale difficulté est alors de trouver "l'échelle" de mesure correspondant au phénomène hydraulique. En effet, il apparaît nettement sur modèle réduit qu'une échelle de quelques mètres permet d'avoir une bonne idée de la dynamique torrentielle. C'est, par exemple, l'échelle des méandres lorsqu'ils apparaissent.

Or, cette distance correspond à quelques centaines de mètres sur le terrain ce qui s'accorde mal à l'observation humaine. En effet, l'être humain ne parvient à observer qu'une distance de l'ordre de quelques dizaines de mètres ou, à partir du versant opposé, l'ensemble du cours du torrent, à une échelle où les particularités morphologiques sont gommées. Cette entrave est difficilement surmontable et le doute sur la validité des mesures est rarement dissipé.

3.4.2. Pentes représentatives

La pente est un excellent exemple de ce problème d'échelle : si l'on effectue une mesure très locale, elle passe de moins de 1 % à près de 70 % en quelques mètres (par exemple lors du passage d'une mouille à un seuil). Il est bien évident qu'aucune de ces deux pentes ne correspond au phénomène hydraulique ayant engendré cette morphologie.

Au contraire, la considération de la pente moyenne (entre la source et le confluent) n'est d'aucun secours pour expliquer les phénomènes de dépôt au sommet des cônes de dépôt.

Il y a donc, même pour un paramètre aussi simple, une difficulté à faire une mesure indépendante de la manière dont elle a été effectuée. Evidemment, une telle situation ne simplifie pas les analyses des données.

Cependant, l'observation de terrain et l'analyse de simulations de crues sur modèles ont permis de dégager 4 échelles significatives distinctes (les distances sont indiquées dans le cas d'un torrent dont le bassin versant couvre quelques dizaines de km²)¹⁵ :

¹⁵ En fait, la taille de bassin versant est un mauvais indicateur et il serait probablement préférable d'utiliser le débit annuel ou décennal mais il s'agit de paramètres peu parlants et non mesurables directement. Cependant, il ne s'agit ici que d'un ordre de grandeur et, dans les Alpes, on peut aussi bien dire d'un torrent que son débit décennal est de quelques dizaines de m³/s ou que son bassin versant couvre quelques dizaines de km².

- **pen­te locale** (de l'ordre de quel­ques mè­tres). C'est la pen­te tenant compte de toutes les par­ticu­larités mor­pho­logiques du lit. C'est elle qu'il faudrait con­sidé­rer en toute rigueur lorsque l'on applique les formules de per­tes de charge ajus­tées à partir d'essais réa­li­sés dans des canaux à fond plat. Ce sont aussi ces pen­tes qui sont employées dans les formules de trans­port solides éta­blies par WHITTAKER & JAEGGI (1982) dans leur étude sur les marches d'escaliers.
- Pen­te "**visible**" : c'est la pen­te qui cor­respond à quel­ques dizai­nes de mè­tres. C'est elle qui semble en relation directe avec les con­di­tions hydrau­liques locales. Par exemple, son utilisation dans une formule de trans­port solide peut per­mettre d'expliquer les dépôts locaux ou le tri granu­lo­mé­trique. Directement liée aux caractéristiques de l'écoulement au cours des crues, c'est elle qui a été retenue pour expliquer la mor­phologie locale. Ainsi, sauf mention contraire, c'est elle qui est mentionnée lors des mesures de terrain.
- La pen­te **d'ensemble** peut être lue sur un profil en long. Elle cor­respond par exemple à la dimi­nution de pen­te le long d'un cône de déjection, ou à l'augmentation locale au niveau d'un confluent. Elle explique les variations mor­pho­logiques globales et les tendances à long terme. Elle gomme totalement la mor­phologie locale, y compris les dunes à forte pen­te lorsqu'elles se produisent.
- Enfin, d'autres pen­tes comme la pen­te moyenne du cours d'eau ou la pen­te de la source à la mer sont citées pour mémoire, car sans rapport avec les caractéristiques mor­pho­logiques du cours d'eau.

Evidemment, ces pen­tes sont liées, le passage d'une échelle à une échelle supérieure s'obtenant par inté­gration. De plus, les ruptures de pen­tes sont exceptionnelles et il n'y a pas de changement brusque lors d'un changement d'échelle.

Cependant, ces différences sont importantes comme le montre le schéma ci dessous : Il s'agit du profil en long de la zone de dépôt du torrent du *St Vincent*.

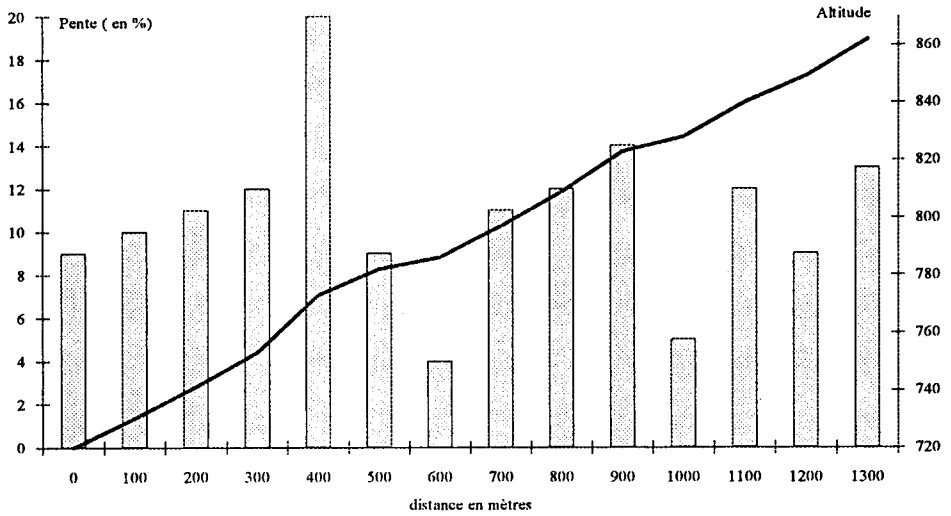


Figure 3-30 : Profil en long avec un pas de mesure de la pente de 100 mètres.

Dans ce cas, les différentes pentes sont les suivantes :

pente	Valeurs observées (%)
locale	1 - 65
visible	4 - 20
moyenne	12

Cet exemple montre clairement que la pente n'est pas un paramètre dont la mesure est aussi simple qu'il y paraît, mais surtout qu'une mesure n'est significative que si l'on en précise l'échelle.

3.4.3. Autres paramètres géométriques

On trouve une abondante littérature abordant le problème des proportions de la section mouillée. Cependant, dans le cas des torrents, la hauteur, la largeur, les dessins en plan du lit etc... ne m'ont jamais paru évidents. Des lits fossiles apparaissent quelquefois, mais il est bien difficile de leur donner une signification.

Les observations sur modèle réduit montrent d'ailleurs un lit extrêmement mobile durant les crues¹⁶ et le lit utilisé au plus fort débit est généralement détruit par les

¹⁶ L'absence de cohésion du matériau, de pavage développé et de végétation favorisent cette mobilité. Cependant, les récits de crues importantes comme les lit majeurs démesurés que l'on peut observer sur les rivières torrentielles des Alpes du Sud, montrent que ces divagations sont importantes au cours des crues.

écoulements ultérieurs. Il est alors bien difficile, à partir des caractéristiques finales du lit, d'imaginer celles des écoulements de crues ou des "débits dominants".

Ainsi, sauf exception, ces caractéristiques géométriques n'ont pas été relevées. Seule une description morphologique, apparemment plus subjective, a été réalisée.

3.4.4. Granulométrie

3.4.4.1. Objectifs des mesures - Restriction au cas d'une mesure locale

L'ensemble des mesures de granulométrie réalisées au cours de cette étude sont destinées à étudier la formation du lit dans le cas du charriage torrentiel.

- **Sur modèle**, cela correspond à la mesure des caractéristiques granulométriques locales de l'ensemble des éléments afin de connaître le maximum de paramètres pour parvenir à expliquer les phénomènes liés au charriage torrentiel.
- **Sur le terrain**, les mesures de granulométrie sont d'abord destinées à servir de support à une analyse du fonctionnement du torrent. C'est donc un complément à l'approche morphologique qui est recherché.

Ainsi, chaque mesure a été systématiquement liée à une morphologie, alors que l'approche classique est d'obtenir un nombre (ou une courbe) utilisable dans une formule. Au contraire, au fur et à mesure de l'avancement de ce travail il est apparu qu'il n'était pas possible de définir une granulométrie "d'ensemble" ni d'éviter une approche plus fine mais plus difficile des phénomènes torrentiels. Les mesures sont alors indissociables de la lecture morphologique qui a été réalisée initialement.

3.4.4.2. Particularité des torrents

La première difficulté - une fois la lecture morphologique accomplie (voir chapitre 7) - est de réaliser une mesure dans une zone qui n'est homogène que par rapport à l'ensemble du lit. On a vu en effet précédemment que la dispersion des mesures réalisées dans une zone initialement considérée comme homogène est très importante.

Deux attitudes peuvent être retenues :

- Choisir une zone encore plus particulière et lui attacher une signification physique. Une telle démarche nécessite la mesure de chaque "sous zone". Mais surtout, elle sous entend qu'il est possible de distinguer avec clarté chaque sous groupe et de lui affecter une signification liée à la dynamique de l'écoulement.
- Rechercher une granulométrie d'ensemble représentative. Cette démarche découle de deux constatations : d'une part, l'étude approfondie de la morphologie - sauf cas particulier - n'est pas encore possible. D'autre part, il semble qu'à l'image de la pente, la granulométrie n'est significative des mouvements d'ensemble que dans le cas où elle correspond à une certaine masse de matériaux.

Ces deux concepts aboutissent à des méthodes de mesures opposées : dans le premier cas, la difficulté sera de réaliser une mesure aussi locale que possible en minimisant le

pas de prélèvement et en suivant non pas une droite, mais une courbe plus resserrée¹⁷. La mesure de la granulométrie des seuils est typique de cette démarche. Dans le second cas, au contraire, on cherchera à couvrir une surface aussi étendue que possible.

3.4.4.3. Mesure par photo

Cette méthode n'a été utilisée qu'à titre expérimental. Les inconvénients liés à la mise en place du matériel et à la taille importante des blocs lui enlèvent l'essentiel de son intérêt. De plus, la mesure par prélèvement linéique fournit déjà la granulométrie des éléments en contact avec l'écoulement. Ainsi, la méthode par photo a été abandonnée dans le cadre des études de terrain.

3.4.4.4. Mesure par prélèvement linéique ou suivant une grille

Au contraire, cette méthode a montré quelle était bien adaptée aux mesures dans les lits de torrent. La démarche était la suivante après le choix de la zone à mesurer :

- **Choix d'un pas de prélèvement.** Il faut qu'il soit supérieur au d_{90} . Considérant qu'il faut une centaine de mesures, la longueur de décimètre nécessaire est alors déterminée. Evidemment, si l'on désire une granulométrie révélatrice d'une zone étendue, il est possible d'effectuer des prélèvements à des distances plus importantes.
- **Mise en place d'un décimètre** de façon à couvrir la zone choisie (suivant l'objectif, on recherchera à couvrir une grande surface ou à avoir un échantillonnage soutenu d'une surface réduite). Il n'y a aucune objection à faire suivre au décimètre une courbe brisée, mais il faut que les choix conduisant à son cheminement soient maîtrisés. C'est le seul moment où l'opérateur dispose de liberté. C'est aussi cette étape qui décide de la représentativité de la mesure.
- **Détermination du grain à prélever.** C'est une opération qui demande de la rigueur. Il faut calculer sous quelle graduation l'élément suivant doit être prélevé. *Ensuite*, il faut rechercher le caillou qui se trouve sous la graduation. Le défaut de parallaxe n'est absolument pas gênant : le décimètre n'est pas utilisé pour faire un prélèvement périodique, mais pour éviter toute subjectivité dans le choix des éléments prélevés. Ainsi, le grain correspondant doit toujours être le premier que l'on voit sous la graduation, même si après déplacement un autre apparaît. D'autre part les éléments fins doivent être pris en compte alors que les débris végétaux ne sont pas considérés comme faisant partie des éléments liés au transport solide. Ils sont donc systématiquement ignorés, en prenant l'élément situé juste dessous, ou lorsque ce n'est pas possible, en effectuant un prélèvement plus loin.
- **Mesure du diamètre intermédiaire.** L'idéal est de prélever le grain, de l'orienter et de le mesurer. Cependant, c'est souvent impossible, soit parce que l'élément est trop

¹⁷ L'aboutissement de cette démarche est le prélèvement suivant une grille des éléments comme l'ont proposé KELLERHALS & BRAY (1971). Cependant, une méthode mieux adaptée aux réalités torrentielles est de déployer un décimètre en suivant grossièrement la forme d'un serpent.

gros, soit parce qu'il est enchâssé dans le lit. Il est quelquefois possible de faire une mesure du diamètre intermédiaire sans déplacer l'élément. Dans le cas contraire, il faut se contenter d'une estimation. Cependant, il ne faut en aucun cas renoncer à considérer cet élément et refaire un autre prélèvement. En effet, l'erreur est beaucoup plus grande en prenant un gravier facilement accessible de 2 cm de diamètre plutôt que d'estimer à 35 cm le diamètre d'un bloc qui en mesure 40! Dans cette étape, il faut se souvenir du rôle mineur des erreurs centrées mais être très attentifs aux biais systématiques tels que l'erreur de parallaxe en utilisant un mètre.

Effectuée ainsi, la mesure de granulométrie fournira une bonne image de la zone de mesure.

3.5. Liste des figures

Figure 3-1 : Définition des trois dimensions orthogonales principales d'un grain (d'après Deloye - 1987)	147
Figure 3-2 : Mesure après différents essais de la granulométrie de la surface par tamisage.	152
Figure 3-3 : Photo de la surface du lit dans le cas du modèle du torrent du St Vincent.....	154
Figure 3-4 : Méthode de reconstitution de la répartition des éléments fins à partir de photographies.	155
Figure 3-5 : Comparaison des granulométries obtenues par la méthode des tamis avec celles obtenues par traitement de photos.....	156
Figure 3-6 : Confrontation de la longueur de traversée avec les trois diamètres caractéristiques.	157
Figure 3-7 : Comparaison de trois mesures utilisant le granulomètre sur le même échantillon.	159
Figure 3-8 : comparaison des mesures de diamètre intermédiaire réalisées avec un mètre.	160
Figure 3-9 : Comparaison des diamètres obtenus avec un compas et des valeurs directement mesurées avec un mètre.	161
Figure 3-10 : Comparaison entre les longueurs de traversée et les mesures obtenues avec le mètre.....	161
Figure 3-11 : Distribution des erreurs de mesures (écart entre les valeurs obtenues par la même méthode sur le même échantillon).....	163
Figure 3-12 : Gain de différence normée par prélèvement.	165
Figure 3-13 : Répartition de la différence normée par décile	166
Figure 3-14 : Auto-corrélation correspondant aux 1200 mesures effectuées sur le torrent de Bresson.....	167
Figure 3-15 : Comparaison de mesures réalisées dans la même zone suivant six transects.	168
Figure 3-16 : Evolution du gain de la différence normée en fonction de la taille de l'échantillon.	169
Figure 3-17 : Répartition de la différence normée par décile pour les mesures de longueur de traversées.	170
Figure 3-18 : Confrontation de plusieurs relevés granulométriques de la granulométrie de base du modèle sans mélange préalable (essais en canal étroit).	175
Figure 3-19 : Mesures granulométriques après mélange à la bétonnière du matériau de base (essais en canal de 60 cm de large).....	176

Figure 3-20 : Confrontation des mesures de granulométrie de base et du lit après pavage dans le cas des essais en canal d'un mètre de long.	177
Figure 3-21 : Comparaison des mesures directes de la granulométrie de base (traits fins) avec la granulométrie de base calculée par l'hypothèse de la couche active.	184
Figure 3-22 : Evolution de la granulométrie du lit pour l'essai 3 avec une épaisseur finale de la couche active de 1.5 d90.	185
Figure 3-23 : Evolution du profil en long au cours de l'essai 4.	186
Figure 3-24 : Principe de la méthode du sel (d'après Cao 1985).	188
Figure 3-25 : Exemple de mesure de vitesse sur canal.	189
Figure 3-26 : Fluctuation de vitesse dans une période de fort transport solide.	190
Figure 3-27 : Augmentation de la hauteur du mélange entraînée par le transport solide.	192
Figure 3-28 : Largeur des lits dans le cas d'un essai en canal de 60 cm de large. ...	193
Figure 3-29 : Décomposition de la section mouillée pour le calcul de l'effet de paroi.	194
Figure 3-30 : Profil en long avec un pas de mesure de la pente de 100 mètres.	198



1 - Introduction - Généralités

2 - Analyse bibliographique

3 - Méthodes de mesure

**4 - Effet local d'un écoulement d'eau claire sur un lit
de granulométrie étendue**

Sommaire

4.1. Introduction	208
4.2. Objectifs de ces essais	208
4.3. Protocole des essais	211
4.3.1. Canal utilisé	211
4.3.2. Processus opératoires	212
4.3.3. Conditions hydrauliques	213
4.3.4. Variables mesurées	213
4.3.5. Particularités de chaque essai	213
4.4. Observations expérimentales.....	215
4.4.1. Description d'un essai	215
4.4.2. Effet du débit nominal d'un essai.....	217
4.4.3. Evolution des conditions d'écoulement.....	225
4.5. Particularités de ces essais par rapport aux approches classiques.....	227
4.5.1. Equations de pertes de charge	227
4.5.1.1. Importance de la submersion relative	231
4.5.1.2. Effet du débit solide.....	234
4.5.1.3. Effet de la pente.....	239
4.5.1.4. Conclusion - physique des phénomènes.....	240
4.5.2. Formules de transport solide	242
4.5.2.1. Formule de Meyer Peter	242
4.5.2.2. Formule de Smart & Jaeggi.....	244
4.5.2.3. Formule de Bathurst	247
4.5.2.4. Formule de Sogreah.....	248
4.5.2.5. Conclusion.....	249
4.6. Paramètres d'étude de la mobilité des grains.....	251
4.6.1. Utilisation du coefficient de masquage.....	251
4.6.2. Définition de l'indice de mobilité relative.....	252
4.6.3. Réduction du nombre de classes granulométriques.....	255
4.7. Première phase : capacité limite de transport.....	258
4.7.1. Evolution du débit solide	258
4.7.2. Evolution granulométrique.....	259
4.7.3. Morphologie	262
4.7.4. Processus physiques.....	264

4.8. Deuxième phase : transition vers le pavage.....	267
4.8.1. du débit solide	267
4.8.2. Conditions hydrauliques	268
4.8.3. Evolution granulométrique	270
4.8.3.1. Granulométrie transportée	270
4.8.3.2. Granulométrie du lit	273
4.8.4. Probabilité de mouvement des grains - bi-stabilité de la granulométrie du charriage hyperconcentré	273
4.8.5. Morphologie - Signification physique.....	276
4.9. Troisième phase : lessivage du lit.....	278
4.9.1. Evolution du débit solide	278
4.9.2. Granulométrie	280
4.9.3. Etat final du lit pavé	281
4.9.4. Morphologie - processus physique.....	284
4.10. Quatrième phase : dépavage.....	285
4.10.1. Evolution du débit solide	285
4.10.2. Granulométries.....	289
4.10.3. Processus physique.....	290
4.10.4. Critère de dépavage - Résultats.....	291
4.11. Conclusion	294
4.12. Liste des figures.....	296

4.1. Introduction

Ce chapitre expose les observations concernant les phénomènes élémentaires (particulièrement le tri granulométrique) liés au charriage torrentiel. Des essais spécifiques concernant le phénomène de masquage microscopique dans le cadre d'une granulométrie étendue et d'une forte pente ont donc été réalisés.

- Dans un premier temps, les objectifs des essais sont exposés. En effet, les actions réciproques sont tellement nombreuses dans ce domaine qu'il est indispensable de bien définir les buts poursuivis. A partir de là, le protocole correspondant est présenté. Les particularités de chacun des 12 essais en canal étroit sont exposées.
- Ensuite, les essais sont décrits à partir des paramètres généraux tels que le débit solide ou les conditions hydrauliques. Cette approche permet de distinguer les quatre phases composant un essai.

Les particularités de ces expériences sont mises en relief par comparaison des mesures avec les formules existantes. La fourchette des conditions expérimentales, trop réduite, ne permet cependant pas de tester la validité des formules.

- Les différents paramètres définissant la mobilité des grains et le tri granulométrique sont ensuite abordés et le calcul de l'indice de mobilité relative est détaillé.
- Enfin, les processus physiques mis en évidence durant les essais sont exposés pour chacune des phases des essais. Il est alors possible de mieux comprendre les phénomènes élémentaires du charriage torrentiel.

4.2. Objectifs de ces essais

A l'issue de l'étude bibliographique, il apparaît que, pour les fortes pentes, une structuration du lit et un tri granulométrique se produisent pour des écoulements forts mais non exceptionnels, ce phénomène conduisant à un lit pavé. Ces conditions hydrauliques correspondraient à une contrainte de cisaillement de l'ordre de la contrainte de cisaillement critique pour les grains les plus gros du lit.

Les interactions sont fortes entre les trois phénomènes suivants :

1. le tri granulométrique,
2. l'effets des marches d'escalier et du pavage,
3. les conditions d'écoulement et le transport solide.

Les liens entre les deux derniers points - évidents lorsque l'on observe un torrent à l'étiage - ont fait l'objet d'études, en particulier de la part de WHITTAKER & JAEGGI (1982) et WHITTAKER (1987). Ces démarches visaient plus l'étude de l'influence de la formation des marches d'escalier que la compréhension du phénomène. D'autre part, elles ont montré l'influence des gros éléments dans la formation du lit.

Le suivi de la formation d'un pavage par le biais de la granulométrie semble fructueux. En effet, il apparaît que l'étendue granulométrique est essentielle à la formation du pavage et que c'est avant tout la variation de la taille des éléments de la surface qui limite la disponibilité des matériaux.

Or tous les modèles mathématiques de transport solide en granulométrie étendue butent sur le manque de connaissances concernant les interactions entre classes granulométriques. Il est donc nécessaire, pour avancer dans la connaissance de la formation du lit, de mieux connaître les phénomènes élémentaires de tri granulométrique.

Cet aspect n'a jamais été considéré de façon isolée, à ma connaissance, dans le cas des torrents à forte pente. De nombreuses raisons expliquent cette lacune :

- la granulométrie transportée et le débit solide pour les écoulements formateurs du pavage ne sont pas connus dans le cas des torrents naturels. Il s'agit d'une zone d'indétermination, l'écoulement ayant un rôle secondaire par rapport à la fourniture de matériaux. Cette incertitude ouvre un champ d'expérimentations d'autant plus vaste que la fourniture amont de matériaux influence considérablement la formation du pavage, comme l'ont montré SHILLER & ROWNEY (1984), pour une pente de 0.5%, avec une granulométrie peu étendue et une re-circulation des matériaux.
- Il est alors nécessaire de faire d'importantes hypothèses sur le "pilotage" du modèle (granulométrie de l'ensemble du lit, de sa surface, mais surtout granulométrie transportée). La plupart des expérimentateurs "règlent" le problème en recyclant les matériaux transportés. Dans ce cas, il est quasi impossible de mesurer les granulométries.
- Le suivi par la granulométrie d'une expérience sur modèle réduit est particulièrement lourd à réaliser. Il est en effet nécessaire de connaître l'évolution en fonction du temps de la granulométrie transportée mais aussi de celle du lit.
- Le tri granulométrique est un phénomène forcément transitoire : en effet, il entraîne une modification de la composition du lit et donc du comportement général du modèle. Ainsi, les expérimentations cherchant à l'étudier présentent forcément une forte évolution des paramètres au cours du temps. Ce caractère transitoire complique l'exploitation des résultats et rend les résultats difficilement généralisables car largement dépendant des conditions opératoires.

La principale difficulté est de délimiter précisément les objectifs et d'en déduire le protocole d'étude correct afin de pouvoir effectuer des mesures correspondant à un phénomène et non pas de mesurer le résultat d'un mélange de phénomènes inconnus.

Il est en effet probable qu'une approche trop globale soit difficilement généralisable. On risque de se retrouver avec une nouvelle série de mesures, incompatibles avec celles déjà obtenues avec d'autres processus expérimentaux car dépendantes d'un trop grand nombre de facteurs.

Dans une première étape, il semble fructueux d'étudier le phénomène fondamental des interactions granulométriques. Il est donc intéressant d'effectuer des mesures relatives aux processus les plus élémentaires et ponctuels possibles.

Les mesures seront utilisées pour mieux comprendre les interactions granulométriques locales en fonction des conditions hydrauliques. On s'intéresse au phénomène de masquage - dissimulation des éléments fins par les plus gros et surexposition des grains. Il s'agit d'un phénomène microscopique au sens de PIANESE & ROSSI (1989) au contraire du pavage qui est macroscopique.

Ensuite, d'autres essais en canal permettront, par augmentation de la surface accessible à l'écoulement, de prendre en compte d'autres phénomènes liés aux divagations et de se rapprocher ainsi des conditions de terrain.

Une telle démarche pose évidemment des problèmes techniques importants. En effet, il n'est pas possible de faire des mesures locales de granulométrie et des conditions hydrauliques durant les essais avec les outils classiques. La démarche employée est alors de réduire autant que possible la taille du modèle afin de pouvoir considérer que tout le canal se comporte de la même façon.

Pour les fortes pentes, avec un écoulement critique, les conditions aux limites sont beaucoup moins influentes qu'en hydraulique fluviale. Il est donc possible de réduire la longueur du canal à 1 m, ce qui serait inimaginable avec des pentes de quelques ‰. Dans cette optique, il est évident que la largeur du canal doit être assez réduite pour obtenir un **écoulement monodimensionnel**[Ⓔ] : en effet, si l'on veut pouvoir considérer que l'ensemble du canal réagit d'une seule façon à une sollicitation hydraulique uniforme, toute divagation est à éviter. Cette démarche accroît encore les écarts avec la réalité, mais permet d'obtenir un phénomène plus élémentaire et donc plus facilement explicable et généralisable par la suite.

Cette méthode présente cependant un inconvénient de taille : dans la nature, en phase d'érosion globale, le lit s'enfonce en restant parallèle à lui-même¹. Or, dans un canal, le niveau est réglé par un seuil aval. L'érosion entraîne directement une diminution de pente². Une solution permet de remédier à cet inconvénient : construire un seuil aval mobile et en asservir le mouvement de façon à conserver la pente. Un seul essai a pu être réalisé de cette façon.

Il est donc nécessaire de connaître localement à chaque instant :

1. **La géométrie**,
2. **Les conditions hydrauliques**. Il est en effet indispensable de pouvoir établir par la suite un lien entre l'évolution du lit et les conditions hydrauliques puis hydrologiques.
3. **La granulométrie du lit**. C'est en effet par ce biais que la transposition au terrain peut être réalisée. D'autre part, elle est indispensable à l'étude des interactions entre l'écoulement et le lit.
4. **La granulométrie transportée**. C'est elle qui permet de quantifier le transport solide de chaque classe granulométrique et de comprendre les liens entre les classes.

[Ⓔ] Ce signe signale les termes définis dans le glossaire.

¹ Il semble que la réalité est plus complexe et dépend des échelles choisies. Sur de longues distances, l'érosion se traduit par un enfoncement du lit sans modification notable de la pente. En effet, même une faible diminution de la pente se traduirait vite par des enfoncements très importants en amont du bief.

Cependant, lors de sa constitution, il semble que le pavage modifie localement la pente (dans le schéma classique, celle-ci est plus faible durant la formation du lit et retrouve la valeur initiale une fois le lit stabilisé). Ce phénomène est décrit au paragraphe 2.7.9.

² Le tri granulométrique mettra donc en jeu sur le modèle une plus grande quantité de matériaux provenant d'amont que d'aval.

4.3. Protocole des essais

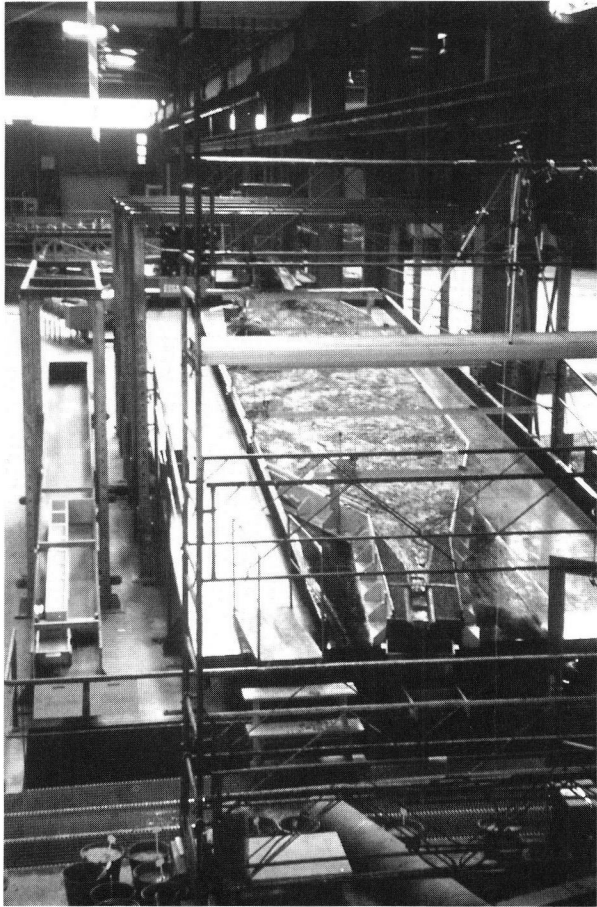
4.3.1. Canal utilisé

Suite à un accord entre Le CEMAGREF, la SOGREAH, les services RTM, le Laboratoire d'Hydraulique de France, une plate-forme torrentielle³ vient d'être construite à Grenoble. Cet outil, unique en France, permet de réaliser des études industrielles dans des conditions plus rationnelles mais aussi d'effectuer des travaux de recherche.

Ces essais ont été les premiers à utiliser le canal adjoint à la plate-forme. La largeur était de 10 cm de façon à assurer un écoulement monodimensionnel même à faible débit. Pour une telle largeur la longueur utile était de 3 m mais seuls 2 m au plus ont été utilisés.

Les parois du canal étaient en contre-plaqué et des fenêtres en Plexiglas permettaient d'observer transversalement les phénomènes. Un seuil mobile se trouvait à l'extrémité aval. D'autre part, l'eau et le débit solide étaient apportés par un lit fixe (bétonné) suivant une pente de 17 %. Ainsi, les effets de bord étaient réduits³.

Figure 4-1 : Photo du canal et de la plate-forme.



³ Lorsque le nombre de Froude oscille autour de l'unité, les conditions aux limites ne sont influentes que sur une longueur de quelques centimètres (à l'échelle du modèle), car les ruptures hydrauliques sont très rapprochées.

4.3.2. Processus opératoires

Les essais étaient constitués de trois étapes (voir figure suivante) :

1. d'abord un écoulement important était appliqué au canal afin de simuler une crue⁴. L'objectif étant de structurer le lit. Le débit décroît linéairement pendant cette étape. Des matériaux sont injectés manuellement à l'amont afin de garder une pente constante. Les conditions hydrauliques correspondent alors aux expérimentations conduites classiquement qui cherchent à déterminer la capacité maximum de transport. Cette étape permettra de situer ces essais par rapport aux approches usuelles du charriage torrentiel.
2. Ensuite, le débit liquide reste constant aussi longtemps que le transport solide est significatif et il n'y a plus d'injection de matériaux en amont. C'est l'étape de pavage proprement dite. C'est l'étape la plus longue puisqu'elle dure environ 2 h contre 10 mn pour la précédente
3. Enfin, après arrêt du débit liquide et mesure de la granulométrie du lit, on applique à nouveau un débit linéairement croissant pour déstabiliser le lit formé à l'étape 2. Cet essai de "dépavage" est destiné à quantifier le résultat obtenu à la seconde phase. Des prélèvements sont réalisés à faible pas de temps (1 mn lorsque le débit solide est suffisant pour pouvoir déterminer la granulométrie à partir d'un échantillon suffisant). L'essai est arrêté lorsque, dans deux prélèvements successifs, des éléments de plus de 1 cm sont présents. L'augmentation du débit est assez lente pour qu'on puisse considérer que l'effet transitoire est négligeable.

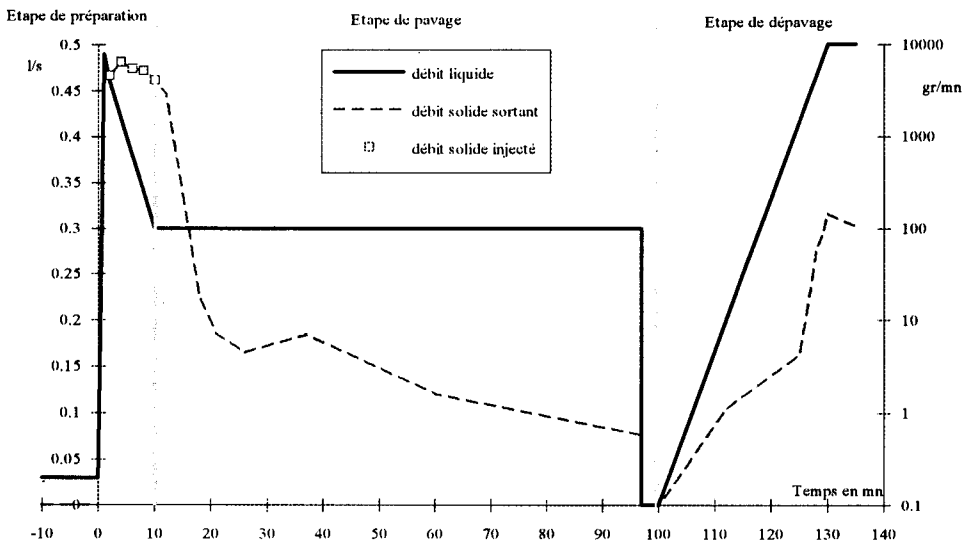


Figure 4-2 : déroulement en trois étapes d'un essai (essai 12).

⁴ Il est nécessaire au préalable de préparer le lit en appliquant un débit liquide d'environ 0.03 l/s pendant environ 1/2 heure après mise en place et tassement du matériau grossier.

4.3.3. Conditions hydrauliques

Les conditions hydrauliques⁵ dépendent de deux paramètres : le débit liquide et la pente. En effet, dans le cadre du charriage torrentiel, on ne peut plus considérer que la granulométrie du lit est une donnée des essais, mais plutôt un résultat du transport solide. Ainsi, plutôt que de calculer le débit de façon à obtenir une contrainte pour un d_{90} inconnu, la démarche a été d'observer les essais réalisés sur la plate-forme torrentielle dans des conditions très voisines et d'en déduire les débits à utiliser.

Deux phénomènes limitent la gamme de débit (pour une pente initiale donnée) :

- Un débit trop fort entraîne une érosion très importante et une variation de pente qui ne peut être négligée. D'autre part, il perd de sa signification physique car les conditions hydrauliques deviennent nettement supérieures à celles qui se déroulent naturellement lorsque la largeur n'est pas limitée.
- Un débit trop faible ne s'écoule plus suivant toute la largeur du canal. Il n'est alors plus possible de conserver l'hypothèse d'écoulement monodimensionnel, indispensable au raisonnement et à certains calculs.

Il est donc apparu, avec la granulométrie employée, que le débit pour un canal de 10 cm de large avec une pente de 12% devait être compris entre 0.2 et 0.3 l/s. La faible étendue de cet intervalle montre le caractère artificiel des conditions expérimentales⁵.

4.3.4. Variables mesurées

Les paramètres suivants étaient mesurés durant les essais :

- Granulométrie de base⁵,
- Débit liquide,
- Profil en long relevé de l'amont vers l'aval pour réduire l'effet de la durée du relevé,
- Prélèvement de tout le transport solide sortant du canal puis - après séchage - détermination de la granulométrie et du poids total de chaque échantillon,
- Mesure de la vitesse de l'écoulement.

Les difficultés et les incertitudes liées à ces mesures ont été abordées au chapitre précédent.

4.3.5. Particularités de chaque essai

Les essais en canal étroit ont été réalisés avec deux longueurs de canal utile (1 ou 2 mètres), et ont été doublés ou triplés afin de connaître la répétitivité des mesures.

Il faut noter que les deux premiers essais (1 & 2) étaient destinés à valider le mode opératoire et que les données correspondantes sont trop incomplètes pour être correctement traitées.

D'autre part, l'essai 15 a été réalisé avec un seuil mobile à l'aval de façon à conserver une pente constante. En outre, le débit nominal était seulement de 0.2 l/s. Or, dans ce

⁵ En effet, la réduction de la largeur prive l'écoulement de sa liberté de manoeuvre. Ainsi, la double contrainte d'avoir un écoulement monodimensionnel et des conditions hydrauliques proches de celles que l'on peut rencontrer lorsque les divagations sont possibles limite grandement le champ des conditions opératoires.

cas, le volume érodé, donc la variation de pente, sont faibles. Aucune différence n'est apparue avec les essais à seuil fixe.

	Canal de deux mètres de long							Canal d'un mètre				
numéro d'essai	03	04	05	06	07	08	09	11	12	13	14	15
débit nominal (l/s)	0.3	0.3	0.25	0.25	0.25	0.2	0.2	0.25	0.3	0.2	0.25	0.2
volume injecté (l)	30	26.4	19.5	20	25	22.5	23.5	23	27	17	19	22
durée totale (mn)	60	90	110	82	76	120	135	180	120	120	120	120
pente initiale (%)	12.7	11.9	12.3	12.2	12.3	12.4	12.5	12.4	12.7	12.4	12.3	12.4
pente après 10 mn (%)	11.1	11.3	12.6	12.1	12.3	12.7	12.8	12	12.1	11.7	11.9	12.4
pente du lit pavé (%)	8.4	9.8	10.7	10.2	9.5	11.2	10.8	10	8.8	10.8	10.4	12.2
pente après dépavage (%)	7.1	8.4	8.9	9.0	8.9	10.1		8.9	8.1	8.6	8.9	

Pour l'essai 9, une erreur de programmation du débit liquide a détruit le lit sans pouvoir faire de mesure. Après l'essai 15, le modèle a été démonté avant de pouvoir réaliser l'essai de dépavage.

On rappelle ci dessous la courbe granulométrique du matériau de base employé pour tous ces essais :

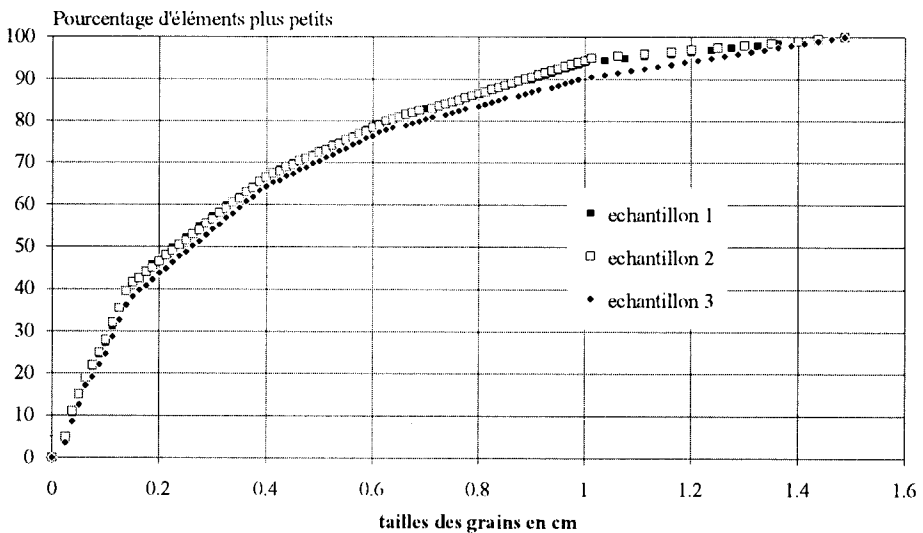


Figure 4-3 : Mesures granulométriques de la granulométrie de base (suivant 3 échantillons).

4.4. Observations expérimentales

4.4.1. Description d'un essai

Il apparaît quatre phases⁶ distinctes durant un essai (la figure 4-4 montre l'évolution du débit solide pour chaque essai) :

1. Le début de l'essai correspond à un très fort transport solide, peu variable dans le temps. Cette phase dépasse légèrement les 10 premières minutes. La concentration en matériau solide atteint 280 g/l. Cette valeur est tout à fait conforme à celles obtenues par SMART & JAEGGI (1983) puisque la formule $C = 6.3 I^2$ fournit une valeur de 255 g/l pour une pente de 12%.

Le transport solide est évidemment continu, mais, même pour le canal d'un mètre de long, on observe un transport des blocs par amas. La surface du lit est constituée de matériaux plutôt fins, et est parcourue par quelques rares antidunes. Le déplacement des matériaux est presque aussi rapide de celui de l'eau et largement indépendant de leur taille. On observe une très forte interaction entre le lit et le transport solide, ces deux éléments connaissant des fluctuations importantes et rapides au cours du temps. **Le débit solide est alors supérieur à 1000 g/mn.**

2. La seconde phase constitue une transition. Le tri granulométrique devient important. Les blocs se regroupent. Les premiers seuils se forment, vite détruits par érosion régressive. Le débit solide est divisé par 100 en 15 mn. Des antidunes se déplacent lentement, et leur interaction avec les paquets de gros blocs semble importante pour la formation du lit.

La formation définitive du lit ne semble possible que lorsque la diminution du transport solide est assez marquée : c'est une caractéristique d'ensemble du lit et non la particularité d'un amas de blocs. En effet, le passage d'un paquet de gros éléments est destructeur, d'une part à cause des chocs mais aussi de l'augmentation temporaire de la hauteur d'eau. Ainsi, il ne peut y avoir qu'une structuration progressive de l'ensemble du lit.

Evidemment, il s'agit d'une interaction entre le lit et le transport solide : on peut tout aussi bien dire que le transport cesse avec la formation définitive du lit.

Cette phase correspond à la prise de contrôle du transport solide par le lit. Dans ce cas, l'écoulement ne peut plus disposer d'assez de matériaux pour que le transport soit à saturation. **Le débit solide chute de 1000 à 10 g/mn.**

3. La troisième phase correspond au lessivage du lit : le transport solide est très faible, avec une décroissance exponentielle en fonction du temps, mais la granulométrie sortante reste fine. Le débit solide passe alors très progressivement de 10 à 1 g/mn au fur et à mesure du lessivage du lit. le phénomène prépondérant est l'arrachement des grains fins derrière les blocs plus gros structurant le lit par les fluctuations turbulentes et non par dépassement de la contrainte de cisaillement globale.

⁶ On distingue ici une *étape* qui concerne le "pilotage" du modèle (débit liquide, injection de matériaux), d'une *phase* de l'essai qui est liée aux phénomènes physiques du charriage torrentiel.

Débit solide

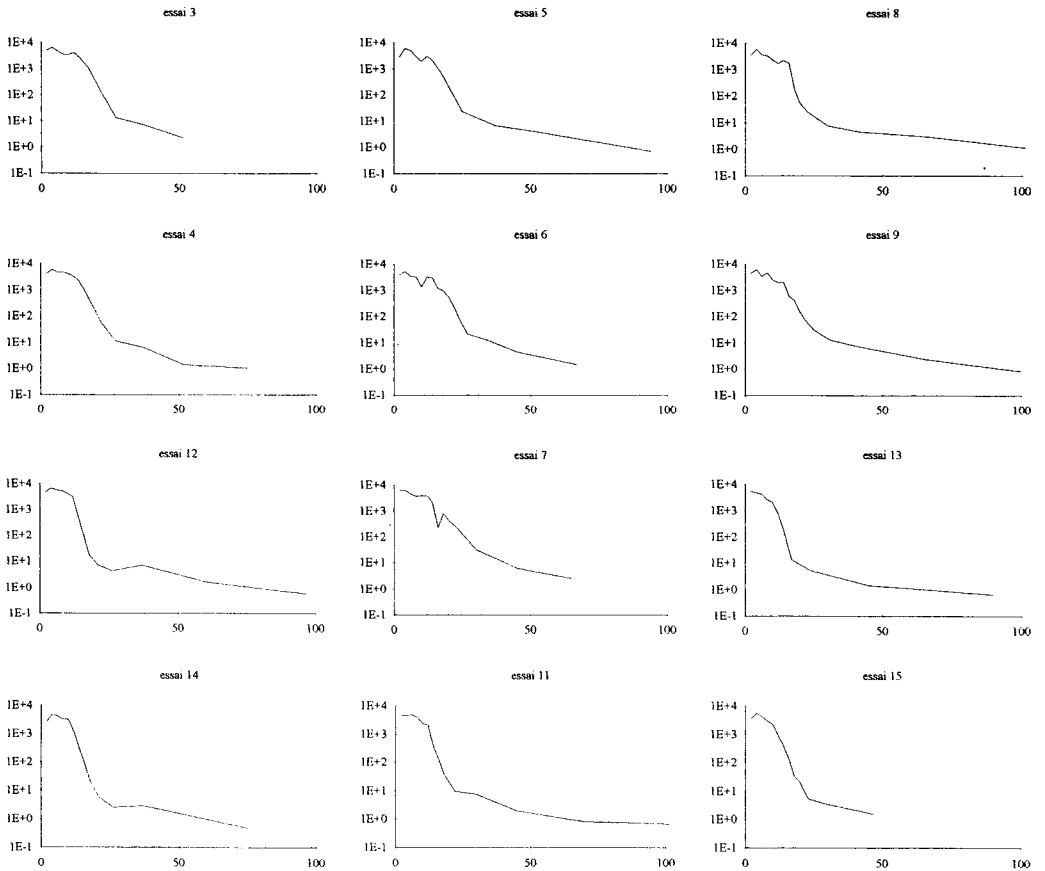


Figure 4-4 : Evolution du débit solide (en g/mn) en fonction du temps pour chacun des essais.

Il s'agit d'un ajustement de détail de la surface du lit, apparemment sans influence sur ces caractéristiques d'ensemble.

4. La quatrième phase concerne le dépavage. Dans un premier temps, le débit liquide est trop faible pour pouvoir déplacer les grains. Puis, peu à peu, certains éléments fins commencent à bouger dans le sillage des blocs puis sont arrachés par la turbulence. Il y a donc, dans un premier temps, un transport de fines exclusivement. Il arrive que dans cette phase préliminaire un bloc soit arraché : c'est probablement un élément qui a été déplacé lors des mesures de la granulométrie du lit à la fin de l'essai de pavage. Enfin, à la faveur de remaniements de la couche superficielle, des éléments de toutes tailles sont arrachés. Le phénomène prend de l'ampleur, et très vite le transport détruit la couche superficielle et reprend les valeurs qu'il avait lors de la première phase.

Le graphique suivant, en montrant les évolutions du débit solide dans le cas du canal de 2 m et la figure 4-7 correspond aux essais dans un canal de 2 mètres de long. Il apparaît que la courbe suit la même forme mais avec un décalage de temps après 10 mn.

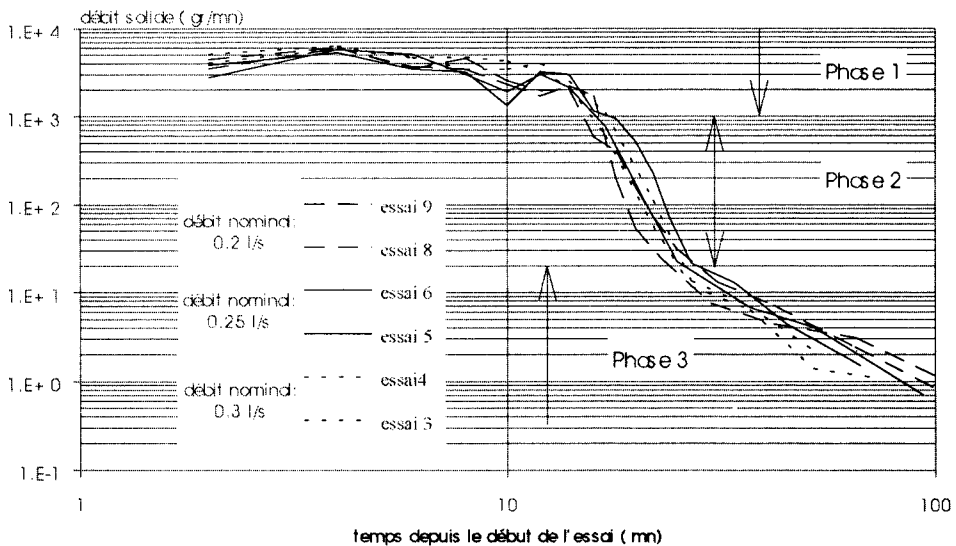


Figure 4-5 : Evolution du débit solide dans le cas des essais en canal de 1 m de long.

4.4.2. Effet du débit nominal d'un essai

Il est important de connaître la répétitivité des essais. En effet, si des conditions expérimentales identiques aboutissent systématiquement aux mêmes résultats, il n'est pas nécessaire de répéter les essais.

Vitesse du fluide

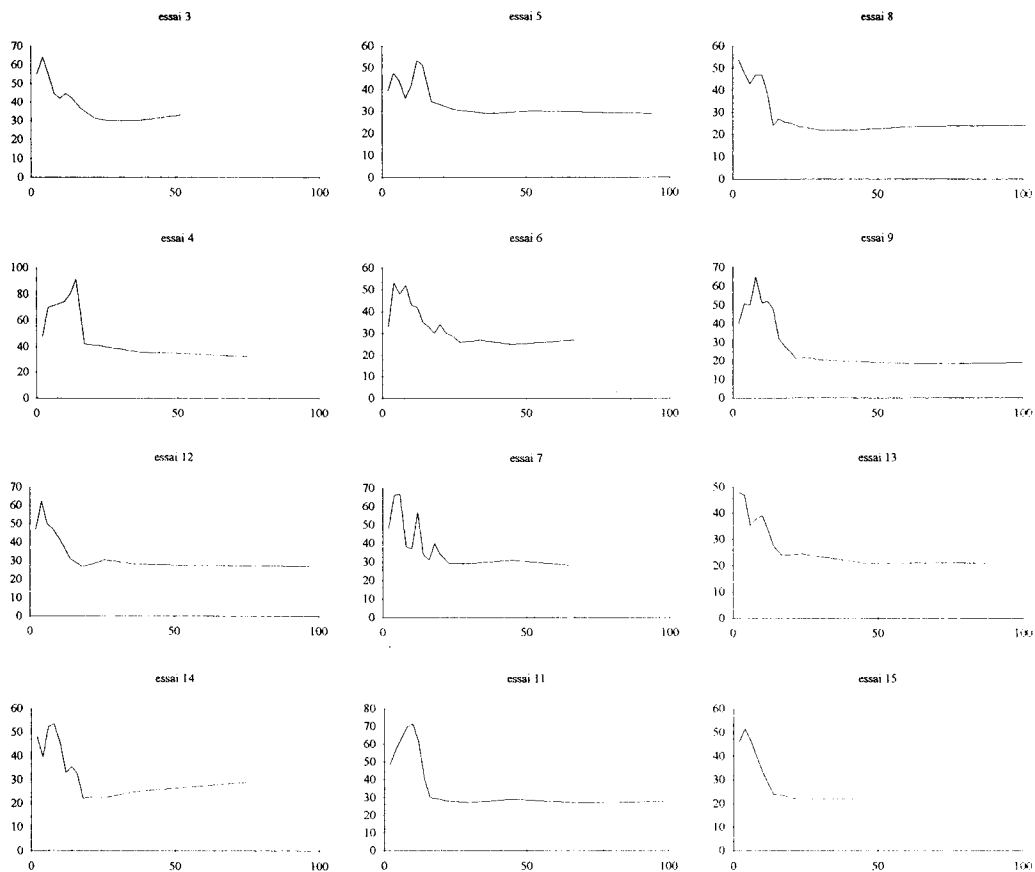


Figure 4-6 : Evolution de la vitesse du fluide durant chaque essai en fonction du temps.

L'axe des abscisses correspond au temps et est gradué en mn,
l'axe des ordonnées à la vitesse (en cm/s).

Dans le cas contraire, de nombreuses répétitions sont nécessaires pour chaque jeu de conditions initiales. Des essais ont donc été conduits plusieurs fois pour un même débit afin de déterminer l'intervalle de confiance des résultats⁷.

Il est nécessaire de définir des critères permettant de distinguer les écarts d'un essai à l'autre. Or le débit solide n'est d'aucun secours. La figure suivante montre l'évolution du débit solide en fonction du temps pour les 3 débits nominaux durant l'essai de pavage :

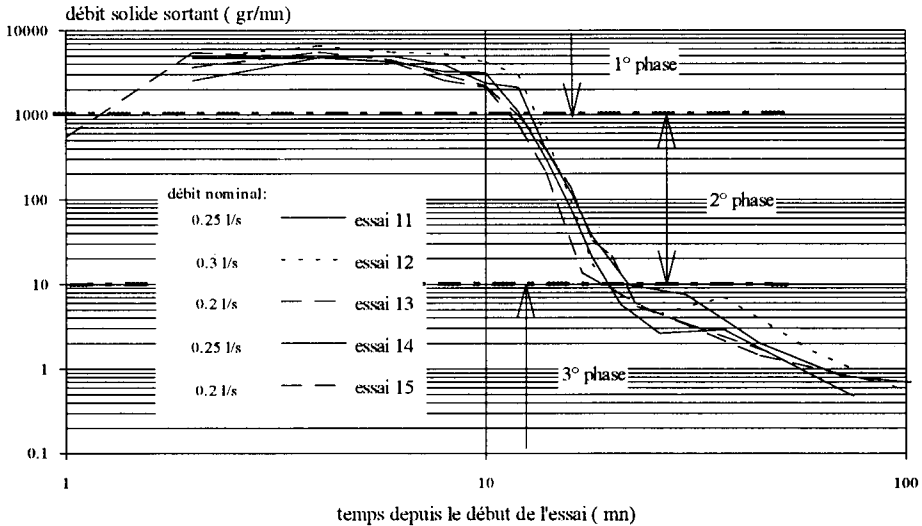


Figure 4-7 : comparaison des débits solides en fonction du débit nominal

Les fortes variations au cours de l'essai (dans un rapport de 10^5) masquent des différences plus faibles causées par des modifications de quelques dizaines de % du débit liquide. D'autre part, les débits liquides les plus élevés correspondent aux plus faibles pentes ce qui compense leur influence et réduit les écarts de débit solide.

C'est donc la pente qui semble le critère le plus utilisable pour distinguer les différents essais. Cependant, comme le montre la figure 4-9, il y a une tendance marquée, mais rien ne permet de proposer une relation biunivoque. Cette dispersion s'explique en partie par la faible reproductivité des conditions expérimentales⁸, mais il semble qu'il y a une variabilité naturelle importante, liée au pavage.

⁷ Cette étude de sensibilité a été conduite uniquement sur le débit nominal car c'est ce paramètre (et la longueur totale) qui distinguent ces essais. Un travail similaire aurait été à conduire sur la pente ou la granulométrie si elles avaient varié.

⁸ On a vu par exemple que la granulométrie n'était pas toujours exactement la même d'un essai à l'autre. D'autres éléments, comme la préparation du lit diffèrent sensiblement.

Hauteur

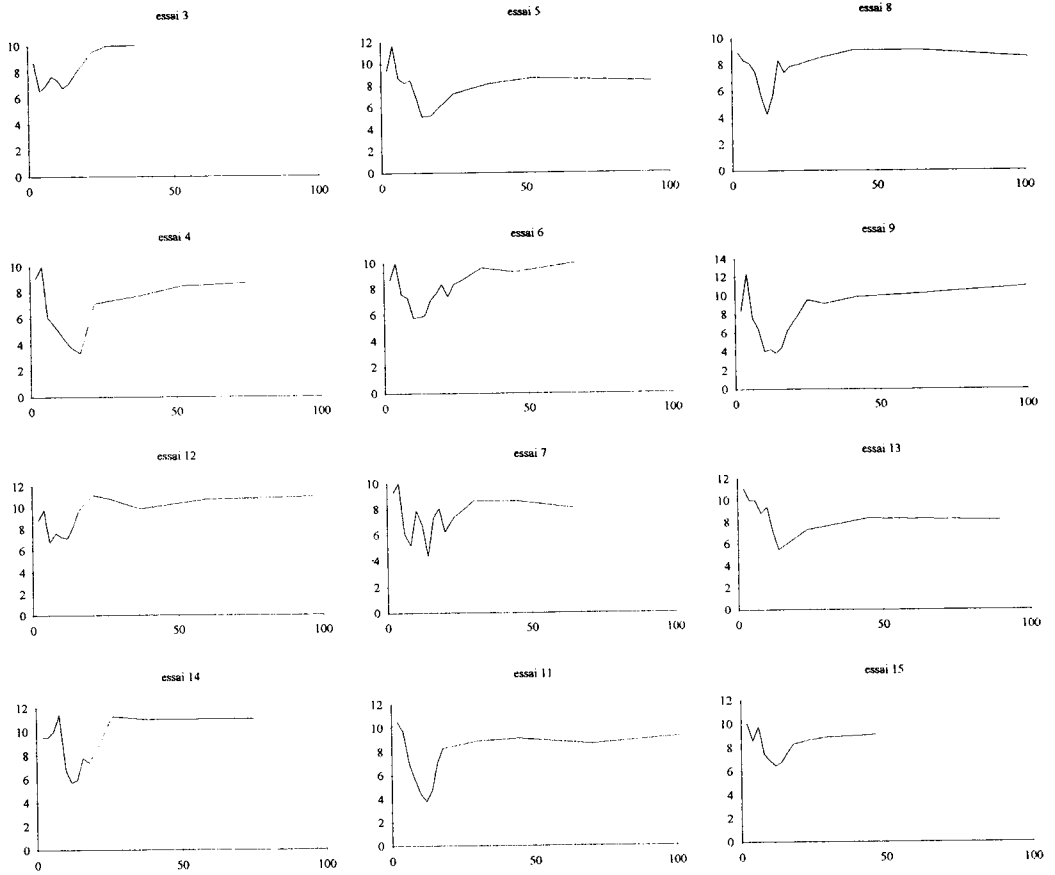


Figure 4-8 : Evolution de la hauteur du fluide durant chaque essai en fonction du temps.

L'axe des abscisses correspond au temps et est gradué en mn,
l'axe des ordonnées à la hauteur du mélange (en mm).

Cependant, on verra au paragraphe 4.9 qu'il est possible de mettre en évidence une relation entre les caractéristiques globales du lit (pente et débit liquide) et sa granulométrie en se basant sur une formule de début de transport.

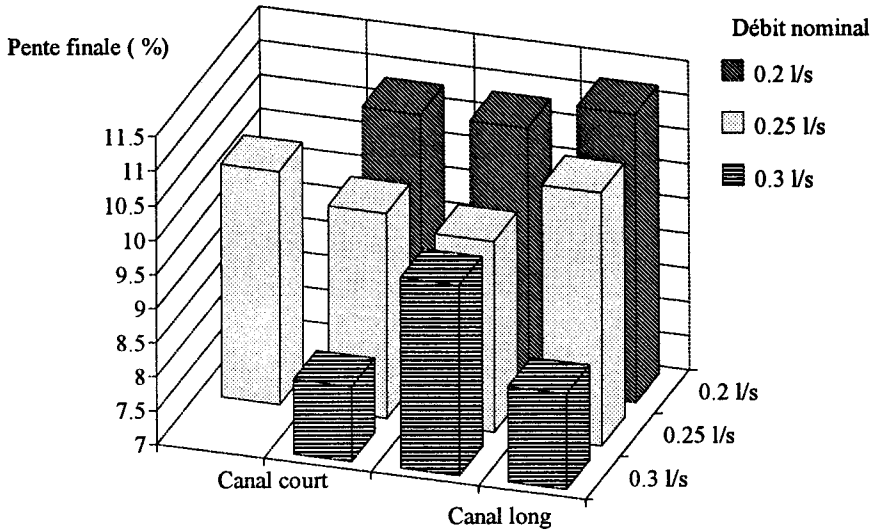


Figure 4-9 : Pente finale des essais en canal étroit en fonction du débit nominal. On a distingué les essais en canal court de ceux réalisés en canal long.

Le volume solide transporté aboutit à une classification identique, ce qui s'explique très bien. Après la première étape où les débits sont proches⁹, tous les matériaux érodés proviennent du lit : il y a alors un changement de pente systématique (évidemment, on ne considère pas le volume transporté durant la phase de dépavage). La figure 4-11 montre la tendance qui se dégage en considérant le volume transporté durant l'essai :

⁹ En effet, durant la première étape de l'essai, le débit passe linéairement en 10 mn de 0.5 l/s au débit nominal. Dans ce cas, les différences de débit nominal ne se font sentir que progressivement.

Nombre de Froude

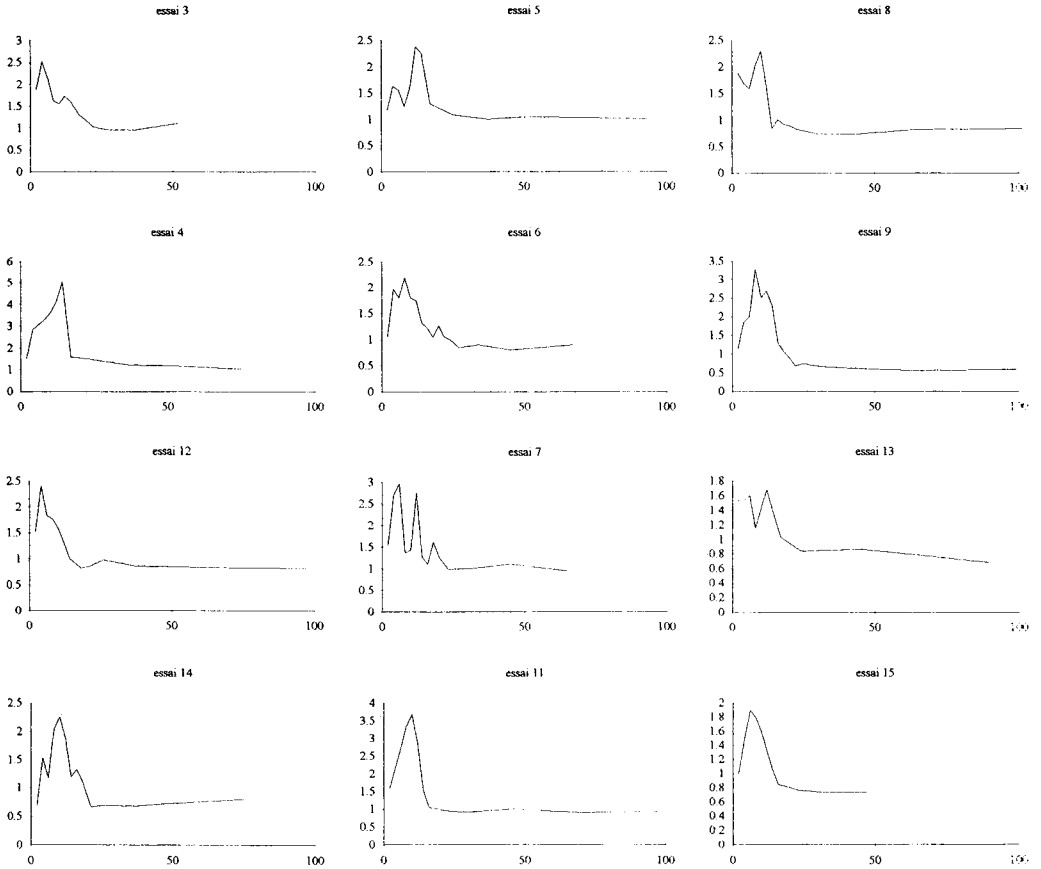


Figure 4-10 : Evolution du nombre de Froude durant chaque essai en fonction du temps.

L'axe des abscisses correspond au temps et est gradué en mn.

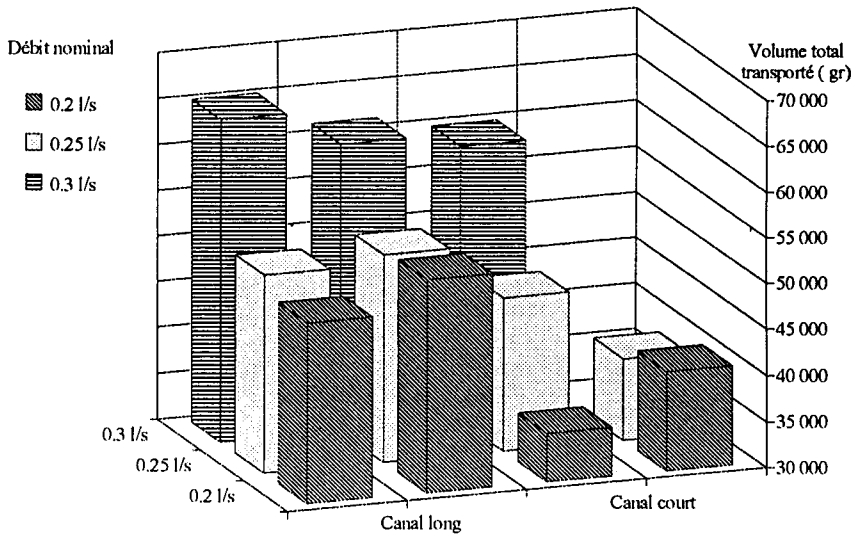


Figure 4-11 : Volume total transporté durant les essais en canal étroit en fonction du débit nominal (on y a inclus l'essai 15).

Il apparaît que le débit nominal de 0.3 l/s se distingue des deux autres plus nettement que lorsque l'on considère la pente : cette différence est due au transport solide accru dans la première étape de l'essai. En effet, le débit liquide passant linéairement de 0.5 à 0.3 l/s, le charriage hyperconcentré dure plus longtemps. Ainsi, la différence avec les autres essais est presque intégralement expliquée par les volumes transportés durant les 11 premières minutes.

D'autre part, les essais en canal court correspondent à un volume solide transporté plus faible que pour un canal long. En effet, pour un changement de pente identique, il faut éroder un volume de matériau d'autant plus important que le canal est long. Cependant, il n'y a pas de rapport direct car la pente diminue seulement pendant une partie de l'essai.

Finalement, il y a bien une évolution des conditions finales des essais et des volumes érodés en fonction du débit liquide nominal des essais, mais elle n'est pas très marquée ni systématique à cause du caractère aléatoire des conditions d'arrêt de l'érosion à la suite de la formation du pavage.

Submersion relative

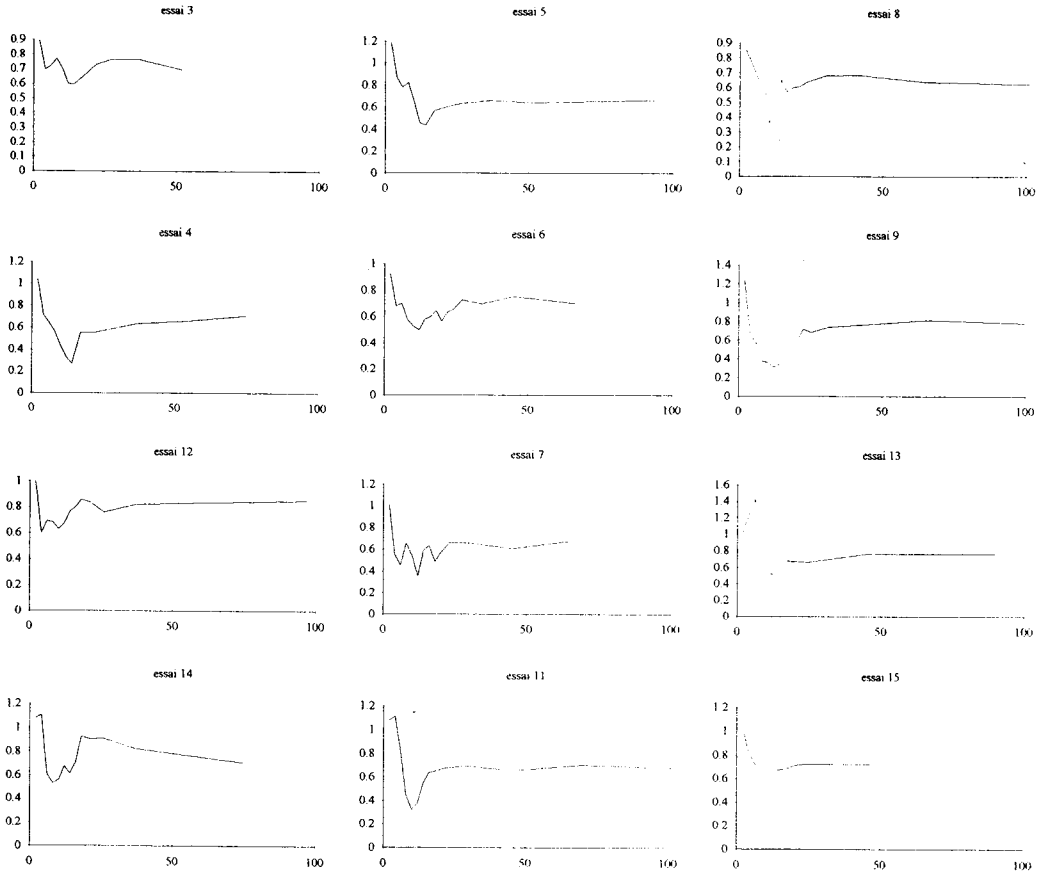


Figure 4-12 : Evolution de la submersion relative (h/d_{90}) durant chaque essai en fonction du temps.

L'axe des abscisses correspond au temps et est gradué en mn¹⁰.

¹⁰ On utilise, pour ce calcul la granulométrie du lit. En effet, on considère que les pertes de charges sont essentiellement causées par le lit et non par les matériaux transportés.

4.4.3. Evolution des conditions d'écoulement

Les conditions hydrauliques sont directement liées à l'évolution globale du modèle. Les figures suivantes montrent l'évolution de la hauteur et de la vitesse du mélange pour chaque essai en fonction du temps. Il apparaît qu'il y a de très fortes fluctuations des paramètres lorsque le transport est important. La principale caractéristique du charriage hyperconcentré apparaît alors : le transport solide a une influence importante sur les conditions d'écoulement¹¹.

Ainsi, la hauteur de l'écoulement est importante au début de l'essai, lorsque le transport solide n'a pas encore remanié le lit. Très rapidement, avec la diminution de la taille des grains du lit, la vitesse de l'écoulement augmente un peu et la hauteur diminue pour atteindre un minimum autour de 10 mn.

On assiste durant la période transitoire à une augmentation de la hauteur d'eau et une baisse importante de la vitesse. Il faut y voir l'effet combiné de l'augmentation de la granulométrie du lit et de la diminution de la pente.

Enfin, dans la partie finale de l'essai, il semble que la vitesse décroît très légèrement alors que la hauteur augmente. La pente, la granulométrie du lit et le débit étant constants, cette évolution pourrait s'expliquer par la structuration du lit (en particulier par les marches d'escalier).

Il semble donc que les caractéristiques de l'écoulement soient directement liées au transport solide et à la formation du lit. Il est intéressant de savoir si les formules usuellement employées sont capables de suivre ces évolutions.

¹¹ Il apparaît que le transport des grains n'influence pas directement les conditions d'écoulement dans d'aussi grandes proportions. Cependant, les variations très rapides de la rugosité du lit liées aux instabilités du transport solide engendrent ces fluctuations.

D30 des matériaux transportés

(en cm)

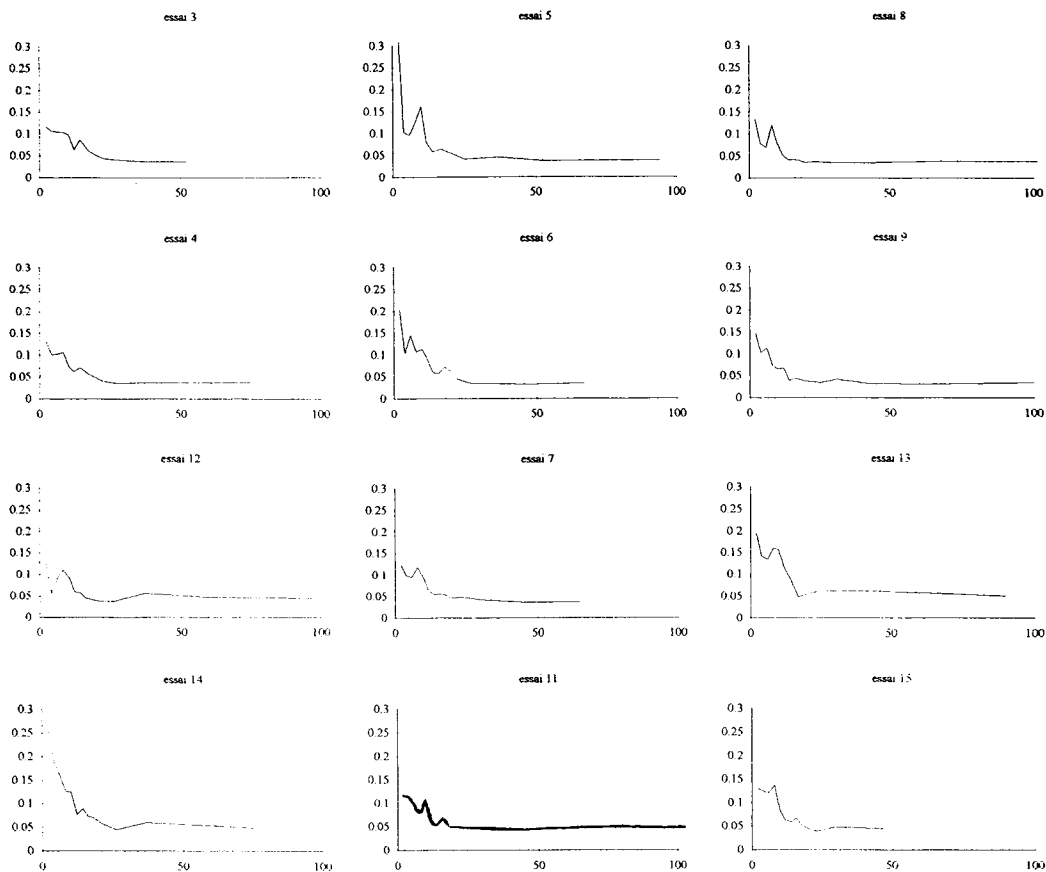


Figure 4-13 : Evolution du d_{30} des matériaux transportés durant chaque essai en fonction du temps.

L'axe des abscisses correspond au temps et est gradué en mn.

4.5. Particularités de ces essais par rapport aux approches classiques

Il s'agit ici de confronter les mesures effectuées avec les formules classiquement utilisées. Il n'est alors pas question de comparer les formules entre elles et d'en tirer des conclusions opérationnelles mais seulement de mettre en lumière les particularités de ces essais et les lacunes des outils actuels. En effet, tous les essais se trouvent dans une fourchette très réduite de pente, de débit et de granulométrie.

Deux aspects ont été considérés : les pertes de charges et le transport solide.

Parce qu'il s'agit de phénomènes différents, les valeurs correspondant aux différentes phases ont été distinguées. En effet, les formules établies ne correspondent - *a priori* - qu'à un phénomène particulier (en pratique, les équations de transport solide sont établies pour la capacité maximale de transport, les équations de pertes de charges correspondant soit à la capacité maximale de transport soit à un lit immobile). Les schémas de ce paragraphe adoptent donc la convention suivante concernant les signes utilisés dans les graphiques :

- ◆ Phase 1 : capacité maximale de transport ($1000 \text{ g/mn} < q_s$)
- Phase 2 : transition et structuration du lit ($10 < q_s < 1000 \text{ g/mn}$)
- Phase 3 : lessivage du lit ($q_s < 10 \text{ g/mn}$).

4.5.1. Equations de pertes de charge

Pour mieux cerner les particularités de ces écoulements, on teste la formulation de Strickler, toujours très employée. Ainsi, la figure 4-15 permet la comparaison entre le coefficient de Strickler calculé à partir des conditions hydrauliques :

$$K = \frac{U}{R^{2/3} \Gamma^{1/2}} = \frac{U^{5/3}}{q^{2/3} \Gamma^{1/2}} \dots \dots \dots (4-1)$$

Et celui exprimé à partir du d_{90} du lit :

$$K = 25 d_{90}^{-1/6} \dots \dots \dots (4-2)$$

On trouvera la liste des symboles utilisés, leur dimension et leur signification dans les premières pages de ce travail.

d₅₀ des matériaux transportés

(en cm)

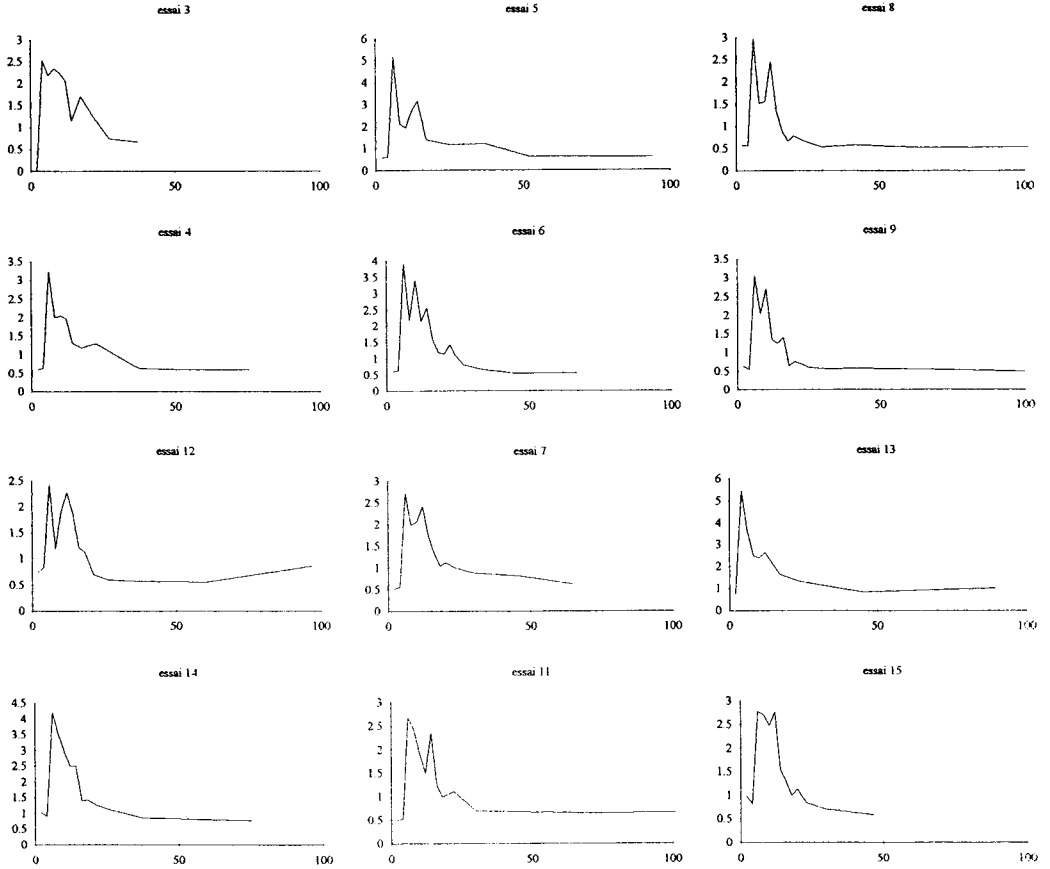


Figure 4-14 : Evolution du d_{50} des matériaux transportés durant chaque essai en fonction du temps.

L'axe des abscisses correspond au temps et est gradué en mn.

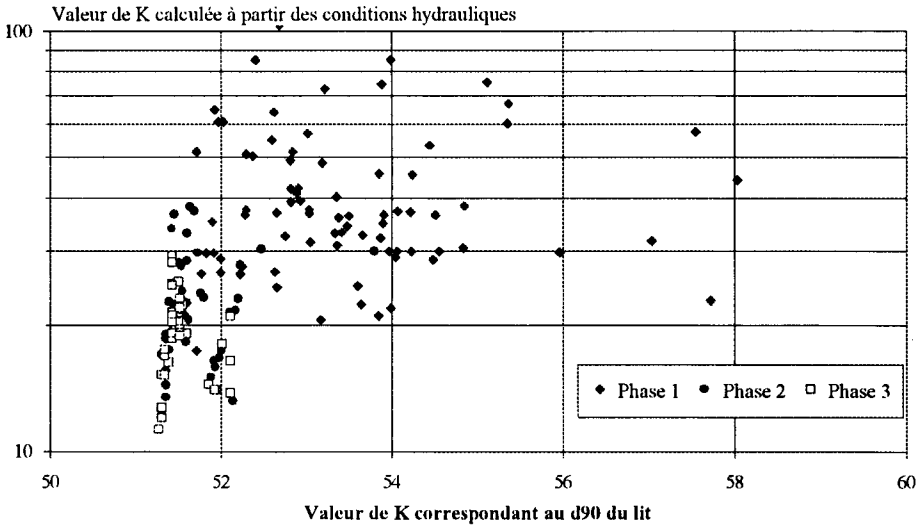


Figure 4-15 : Confrontation de la granulométrie du lit avec les conditions d'écoulement à travers le coefficient de Strickler.

Il apparaît nettement qu'il n'y a aucun lien entre les deux paramètres. Cet accroissement des pertes de charge par rapport à l'hydraulique classique peut s'expliquer à partir des éléments suivants :

- la pente de ces essais est comprise entre 8 et 12%, c'est à dire pour des valeurs bien supérieures aux expérimentations habituelles. La formulation de Strickler n'est alors plus acceptable.
- la submersion relative (rapport de la hauteur d'eau sur le diamètre des éléments du lit figure 4-12) est extrêmement faible puisqu'elle est généralement inférieure à 1 et même à 0.5. Or, l'étude bibliographique a montré que l'écoulement est plus uniforme et plus lent dans le cas d'une faible submersion relative.
- le débit solide prend une influence considérable puisque la concentration en matériaux peut atteindre 200 g/l. Cependant, on ne peut en tirer une relation car les transports solides les plus forts correspondent aux vitesses les plus élevées. Mais la vitesse serait probablement encore plus élevée sur un lit fixe de même granulométrie, comme l'approche classique de décomposition de la contrainte le laisse penser.
- le nombre de Froude augmente entre le début de l'essai et la fin de la première phase pour atteindre des valeurs proches de 2 ou 3 (figure 4-10). Après une réduction progressive durant la phase de pavage du lit, il se stabilise entre 0.7 et 1 durant la troisième phase de lavage du lit. Cette fixation autour de l'unité est représentative des écoulements "troublés" au sens de ZGHEIB (1990) où les ressauts génèrent des pertes de charge importantes. On retrouve ainsi que les formes du lit limitent la vitesse de l'écoulement.

D90 des matériaux transportés

(en cm)

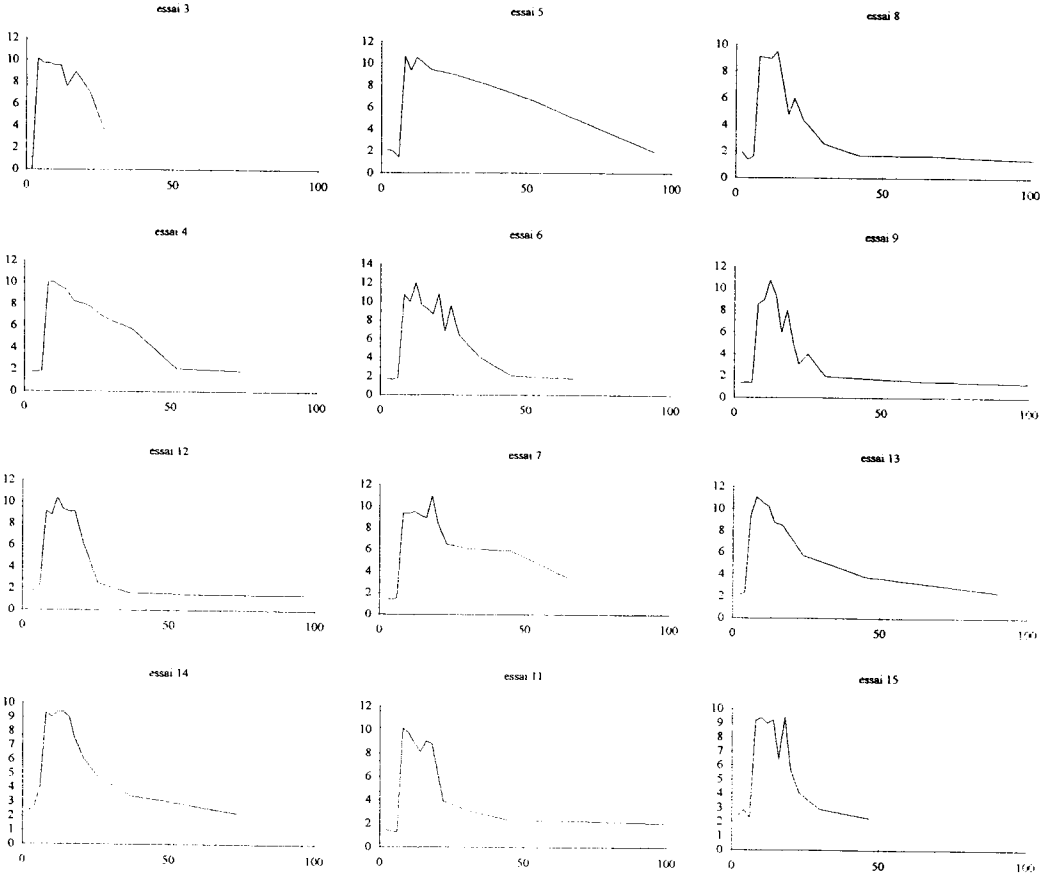


Figure 4-16 : Evolution du d_{90} des matériaux transportés durant chaque essai en fonction du temps.

L'axe des abscisses correspond au temps et est gradué en mn.

La rugosité des éléments du lit n'est donc pas le seul critère qui intervient dans la perte de charge de l'écoulement. La formule classique de Strickler n'est donc pas satisfaisante. Il est alors nécessaire d'essayer d'autres formulations plus empiriques correspondant à une forte pente et une faible submersion relative. Elles permettront de mettre en évidence les phénomènes physiques se produisant durant les essais. Des explications sur le comportement de l'écoulement seront proposées au paragraphe de conclusion sur les conditions d'écoulement (4.5.1.4).

4.5.1.1. Importance de la submersion relative

Une première famille de formulations fait apparaître la submersion relative, généralement exprimée par le rapport R/d_{90} , pour expliquer le coefficient

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{\sqrt{g R I}} \dots\dots\dots(4-3)$$

La figure 4-17 montre les deux paramètres pour chaque essai. Il apparaît qu'il n'y a pas de liaison directe ni univoque entre les deux coefficients : les courbes correspondent plutôt à des boucles. Le coefficient $\sqrt{8/f}$ faible au tout début de l'essai augmente rapidement avec l'établissement du transport solide. Cette évolution est suivie par une diminution de la submersion relative. Ensuite, durant la première phase il y a une certaine stabilité des deux paramètres puis, la submersion relative augmente à nouveau, alors que le coefficient $\sqrt{8/f}$ diminue, et retrouve des valeurs inférieures à celles du début de l'essai.

Cette évolution permet de dégager les éléments suivants :

- La phase de fort transport solide correspond à une vitesse d'écoulement très importante. On retrouve là l'effet du transport solide sur la granulométrie du lit.
- Le pavage du lit correspond à une nette diminution de la vitesse, qui n'est pas seulement expliquée par la granulométrie mais aussi par la structuration du lit.

Ainsi, il est peu probable qu'une formule existante puisse être représentative des conditions de ces essais. D'autre part, il convient de remarquer que les conditions hydrauliques mesurées lors de l'essai 4 sont suspectes : elles se distinguent nettement des autres alors que les conditions expérimentales étaient similaires.

La première formule testée est celle proposée par LIMERINOS (1970) établie à partir de mesures de terrain :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 3.38 + 5.75 \log \left(\frac{R}{d_{84}} \right) \dots\dots\dots(4-4)$$

Coefficient $\sqrt{\frac{8}{f}}$ en fonction de la submersion relative

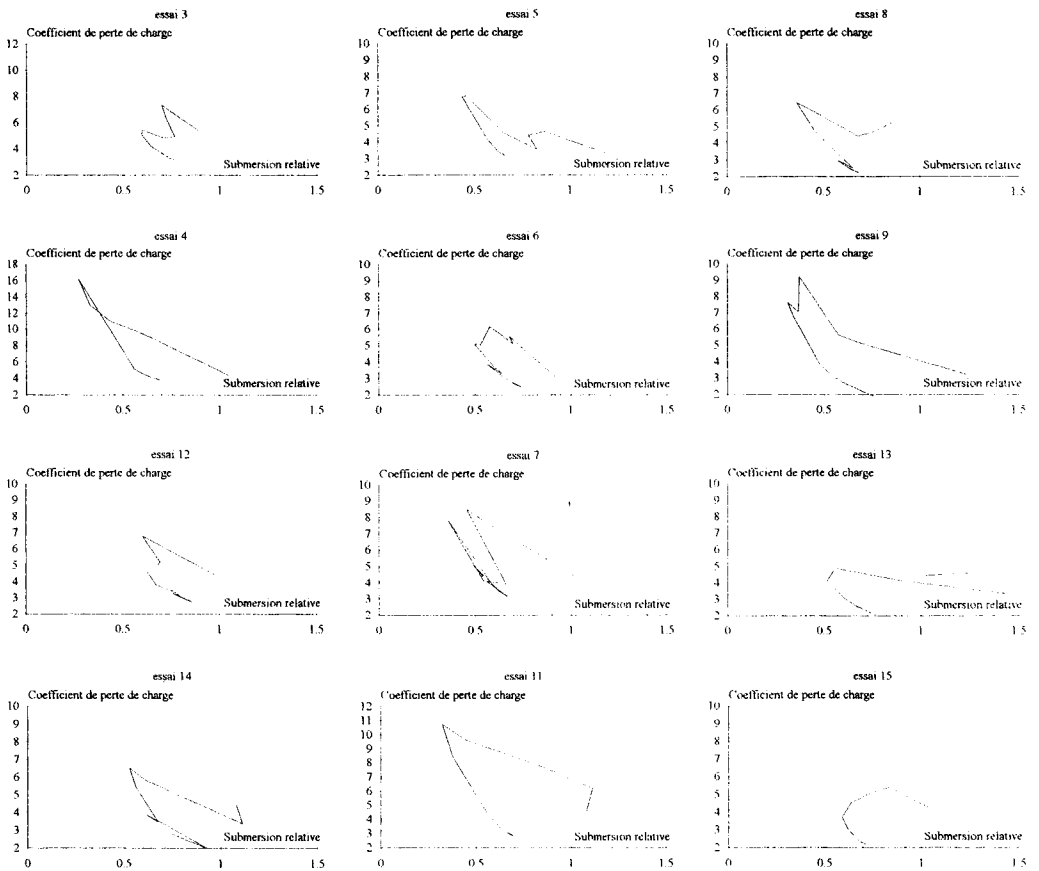


Figure 4-17 : Evolution du coefficient de friction en fonction de la submersion relative durant chaque essai.

La figure suivante permet la comparaison entre valeurs mesurées et valeurs calculées. Le d_{84} a été remplacé par le d_{90} dans le calcul.

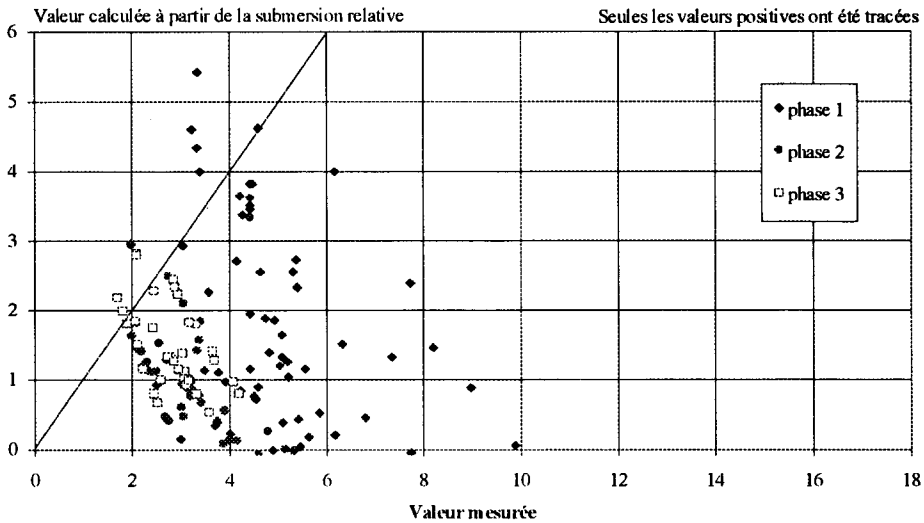


Figure 4-18 : Comparaison des valeurs mesurées et calculées de $\sqrt{8/f}$ à partir de l'équation de LIMERIONS.

Il apparaît que la dispersion est bien supérieure aux erreurs de calcul et de mesure. La formulation de LIMERINOS sous estime fortement le coefficient $\sqrt{8/f}$ c'est à dire qu'elle sous estime la vitesse pour une pente et une hauteur d'eau fixées. Ce résultat s'explique par l'importance que prend la submersion relative lorsqu'elle devient inférieure à 1. On sort alors très nettement du domaine de validité de cette formulation puisque l'on obtient de très nombreuses valeurs négatives pour le coefficient $\sqrt{8/f}$! Cette formule avait été établie à partir de mesures de terrain, c'est à dire pour un lit pavé : elle correspond seulement à la troisième phase des essais.

Pour cette phase, la dispersion est considérablement réduite et l'ordre de grandeur des paramètres est satisfaisant : on peut en conclure que cette formule suit bien les évolutions des conditions d'écoulement tant que la submersion relative reste supérieure à l'unité et que le transport solide est réduit.

D'autres formules basées sur la submersion relative sont très proches de celle de Limerinos. Leur application n'apporterait donc pas d'éléments nouveaux.

THOMPSON & CAMPBELL (1979) se sont basés sur la similarité entre le blocage de l'écoulement par les gros blocs et les écoulements d'air autour des grands bâtiments. Ils proposent alors une formule valable pour une submersion relative comprise entre 0.36 et 1.67 ce qui correspond bien au cadre de ces essais. Cependant ils sont basés sur des essais à très faible pente :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = (1 - 0.1 \frac{k_s}{R}) (6.25 + 5.75 \log(\frac{R}{k_s})) \dots \dots \dots (4-5)$$

avec $k_s = 4.5 d_{50}$

La figure suivante montre que cette formulation suit mal les évolutions du coefficient $\sqrt{8/f}$. Il apparaît un biais systématique, le coefficient étant sous estimé dans la dernière phase des essais alors qu'il est surévalué lorsque le transport solide est important. Il semble que cette tendance peut être expliquée de deux façons :

- la formulation donne une trop grande importance à la granulométrie du lit et ne tient pas compte de sa structuration et de l'effet des amas de bloc.
- Le transport solide intervient sans doute directement dans les pertes de charges. Or, il n'a pas été pris en compte dans cette formulation. Ainsi, il peut expliquer que cette formulation surestime la vitesse pour les forts débits solides.

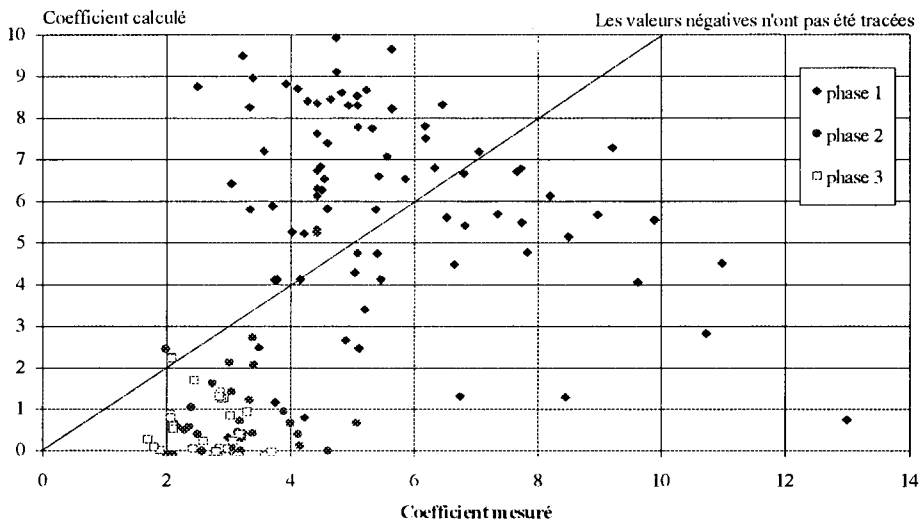


Figure 4-19 : Résultat des calculs de $\sqrt{\frac{8}{f}}$ basés sur la formule de THOMPSON & CAMPBELL.

4.5.1.2. Effet du débit solide

GRIFFITHS (1981) a proposé deux formulations suivant que le lit est en mouvement ou non. Celle correspondant à un lit immobile ne donne satisfaction en aucun cas dans le cadre de ces essais.

La formulation correspondant à un lit en mouvement considère la mobilité des grains plutôt que la submersion relative en exprimant le rapport vitesse d'écoulement sur la racine du d_{50} . En effet, à partir de considération théorique de KENNEDY et d'EINSTEIN, il montre que le rapport R/d_{50} n'est plus influent lorsque le débit solide est élevé. Il propose finalement :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 6.25 \left(\frac{U}{\sqrt{g d_{50}}} \right)^{0.34} \dots\dots\dots (4-6)$$

Il n'est plus possible d'effectuer une comparaison directe de $\sqrt{8/f}$ car il est exprimé à partir de la vitesse dans les deux équations 4-3 et 4-6. La figure suivante compare donc directement la vitesse calculée et la vitesse mesurée :

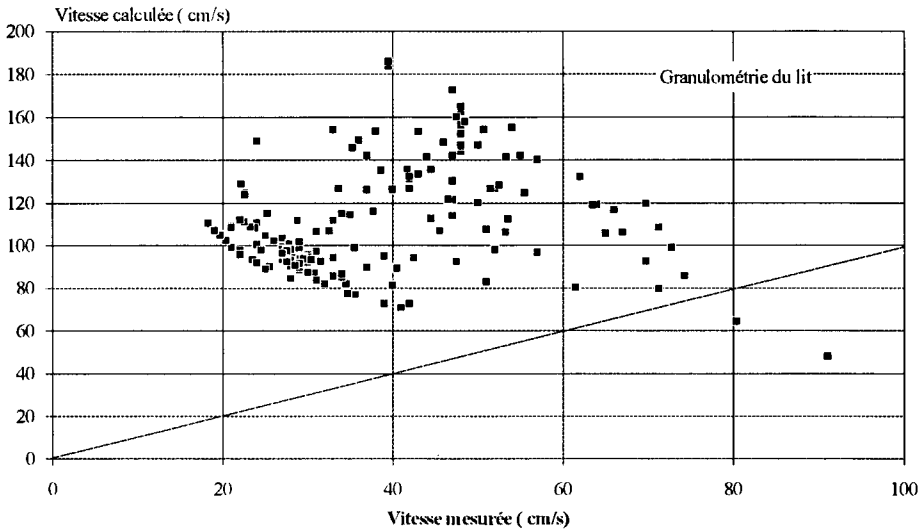


Figure 4-20 : Calcul de la vitesse de l'écoulement en utilisant la formule de Griffiths à partir de la granulométrie du lit.

Il apparaît nettement qu'il n'y a aucune amélioration par rapport aux expressions précédentes.

L'introduction de la mobilité du grain pose le problème du choix de la granulométrie à utiliser. Dans la formulation précédente, la submersion relative s'exprime en fonction de la granulométrie du lit mais lorsque l'on exprime la mobilité des grains, il semble préférable d'utiliser les caractéristiques des éléments transportés.

Or, la distinction entre granulométrie transportée, granulométrie initiale utilisée pour un essai et granulométrie du lit n'est jamais abordée dans ce genre d'approche. Cette lacune s'explique par trois raisons :

1. Si l'on considère du transport solide dans ce genre de formule, celui ci est toujours assez important pour que la différence entre les trois granulométries précédentes ne soit pas significative.
2. Les expérimentations correspondent généralement à une granulométrie uniforme ou très resserrée ce qui limite encore les écarts.
3. enfin, il est rare que l'on connaisse à la fois la granulométrie transportée et la granulométrie du lit à chaque instant durant un essai. La distinction entre les deux paramètres ne peut alors apparaître dans les formulations.

Cependant, dans le cas de ces essais, la différence entre les deux granulométries est considérable et la figure suivante montre que le rapport $d_{50\text{lit}} / d_{50\text{transporté}}$ varie dans un rapport de 1 à 50 alors que le rapport des d_{90} est encore plus variable. On ne peut donc ignorer cette différence.

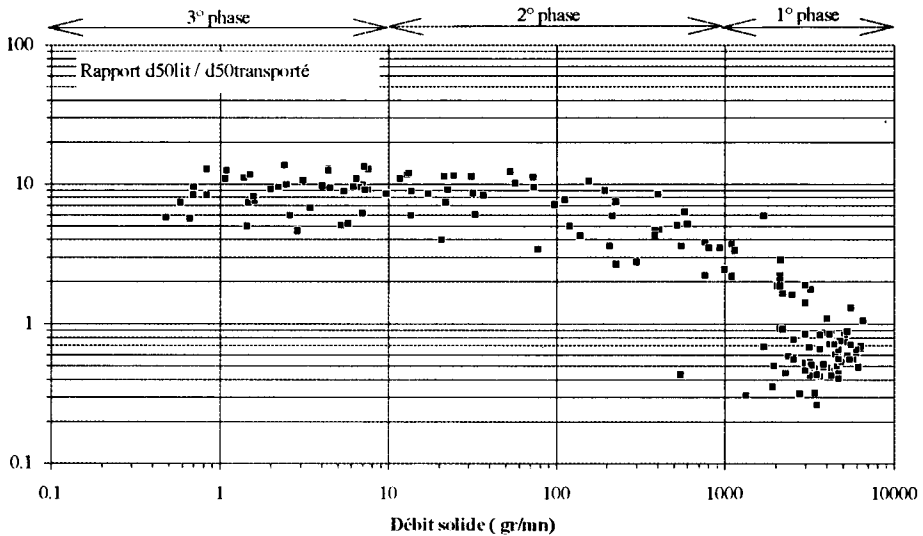


Figure 4-21 : Comparaison de la granulométrie transportée et de celle du lit à travers le d_{50} en fonction du débit solide.

Physiquement, le choix d'un de ces paramètres signifie soit que l'on considère la mobilité des grains déplacés par l'écoulement plutôt dans le cadre d'un transport établi, soit que l'on veut faire intervenir celle des éléments du lit privilégiant alors l'arrachement des grains, ou l'effet de la surface du lit sur l'écoulement.

Dans le cadre d'un essai de pavage, il est difficile de trancher, étant donnée la faible connaissance que l'on a de ces phénomènes. C'est pourquoi les calculs sont effectués dans les deux cas, la plus ou moins bonne concordance entre calcul et mesure permettant de mieux connaître le phénomène à prendre en compte.

Cependant, pour cette formule, la dispersion est trop importante et le jeu de paramètres correspond à une fourchette trop réduite pour pouvoir trancher, la prise en considération de l'une ou l'autre granulométrie conduisant à des résultats assez semblables.

Au cours de leurs travaux, SMART & JAEGGI (1983) ont établi une formule de perte de charge adaptée aux fortes pentes et à un débit solide important. L'originalité de leur travail est de prendre en compte le transport solide directement dans la formule de perte de charge, se conformant ainsi une caractéristique particulière du charriage hyperconcentré. Cependant, les conditions des essais réalisés ici sont assez différentes dès le début de la deuxième phase, l'influence du transport solide sur l'écoulement devenant négligeable.

Là encore, la granulométrie intervient dans leur formule. Il convient donc de savoir si la granulométrie à prendre en considération est celle du lit ou celle des particules en mouvement. Les calculs seront donc réalisés dans les deux cas. La première étape consiste à calculer la hauteur du mélange h_m à partir du débit solide par la formule :

$$h = h_m(1 - 1.41 I^{1.14} q_{s*}^{0.18}) \dots\dots\dots (4-7)$$

La différence entre les deux calculs (avec la granulométrie du lit ou celle du transport) ne dépasse que très rarement 5 %. Ensuite, la formule de perte de charge de SMART & JAEGGI peut être utilisée, toujours en faisant les mêmes hypothèses sur le choix de matériau (lit ou transport). Elle s'écrit :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2.5 \left(1 - e^{-\frac{0.05 h_m}{\sqrt{I} d_{90}}}\right) \ln\left(8.2 \frac{h_m}{d_{90}}\right) \dots\dots\dots (4-8)$$

La figure suivante montre la confrontation des valeurs calculées avec les valeurs mesurées en prenant en compte les granulométries du lit. L'écart entre le calcul et la mesure n'est pas assez significatif pour adopter ou repousser l'expression de SMART & JAEGGI dans le cas général. Cependant, il apparaît clairement que, dans la gamme étroite balayée par les essais, il n'y a pas de relation entre le coefficient $\sqrt{8/f}$ calculé et celui qui est mesuré.

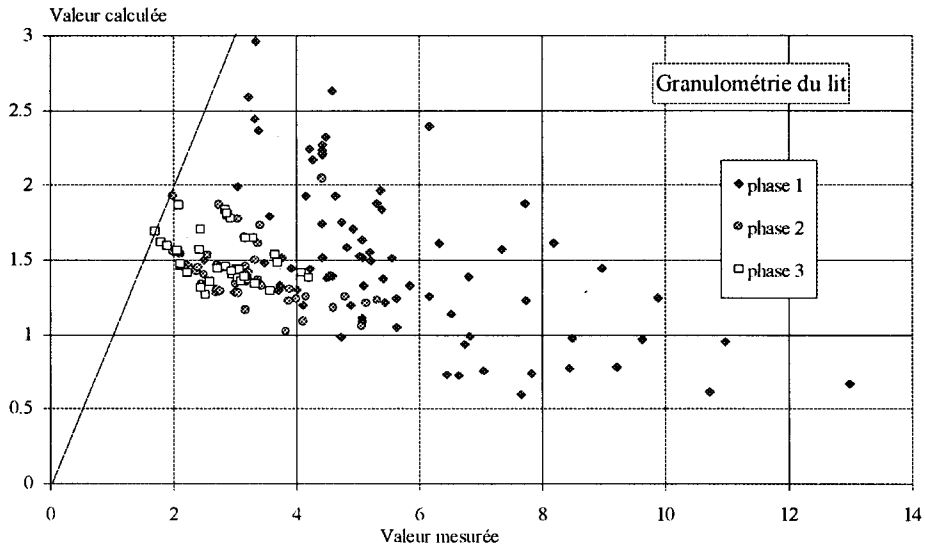


Figure 4-22 : Valeur du coefficient de perte de charge calculé avec la formule de SMART & JAEGGI (1983).

Comme le montre la figure suivante, l'écart entre la formule et les mesures augmente avec le débit solide, mais la tendance est peu marquée et la dispersion est assez réduite tant que le débit solide est inférieur à 1000 g/mn. Au-delà, les fluctuations de vitesse liées au charriage hyperconcentré apparaissent nettement : même en considérant la granulométrie du lit, les variations de la vitesse sont très importantes¹². Cependant, en moyenne, la dispersion est relativement faible puisque l'écart est de l'ordre de 1 à 2.

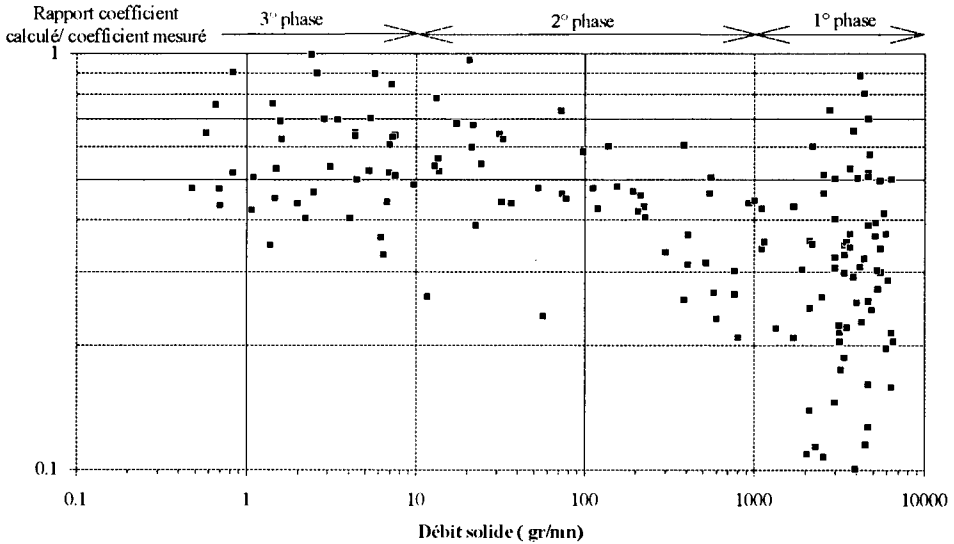


Figure 4-23 : rapport $\sqrt{8/f}$ calculé / $\sqrt{8/f}$ mesuré en fonction du débit solide (formule de SMART & JAEGGI).

Si l'on considère la granulométrie transportée, ce qui est beaucoup plus en rapport avec l'approche de SMART & JAEGGI (1983), la dispersion est assez faible, mais les valeurs s'organisent autour d'une tendance qui n'est pas du tout représentée par la bissectrice :

¹² Il est vrai que la mesure de granulométrie correspond à une moyenne sur deux minutes dans les phases de fort transport solide. Or, les fluctuations de granulométrie et de vitesse sont plus rapides. La méthode de mesure de la vitesse permet de suivre des fluctuations très rapides (de l'ordre de quelques dizaines de secondes). Finalement, la méthode de mesure retenue ne permet pas d'avoir un bon suivi des fluctuations dans la période de fort transport solide car le pas de temps correspondant à la détermination de la granulométrie est trop grand.

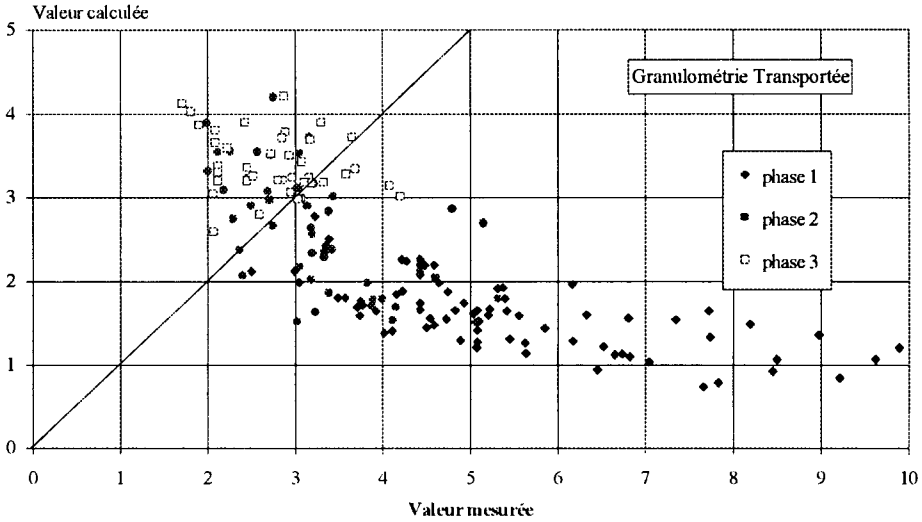


Figure 4-24 : Confrontation du calcul du coefficient de friction à partir de l'équation de SMART & JAEggi et la granulométrie transportée avec les valeurs observées.

Cependant, le résultat obtenu en considérant la granulométrie transportée est meilleur que le calcul basé sur les caractéristiques du lit.

Il apparaît nettement qu'il y a un lien direct avec le débit solide : lorsque le transport solide est très intense (phase 1), le coefficient calculé est inférieur à celui mesuré : la vitesse est alors sous estimée par la formule. Au contraire, lorsque le transport solide est faible, le coefficient, donc la vitesse calculée sont surestimés (phase 2 et surtout phase 3).

Ainsi, il semblerait que la formule de SMART & JAEggi surestime l'influence directe du débit solide sur l'écoulement et ne considère pas l'effet spécifique de la rugosité de peau.

4.5.1.3. Effet de la pente

Une dernière famille de formulations réduit le rôle de la pente en la faisant intervenir dans l'expression du coefficient de perte de charge. Ainsi, MEUNIER (1991), à partir des données de SMART & JAEggi, propose :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2.23 \left(\frac{h_m}{d_{90}}\right)^{.35} I^{-0.2} \dots\dots\dots (4-9)$$

alors que RICKENMANN (1990) obtient à partir de ses travaux :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 1.5 \left(\frac{h_m}{d_{90}}\right)^{.5} I^{-0.29} \dots\dots\dots (4-10)$$

Les résultats issus de ces deux formules sont présentés dans le graphique suivant :

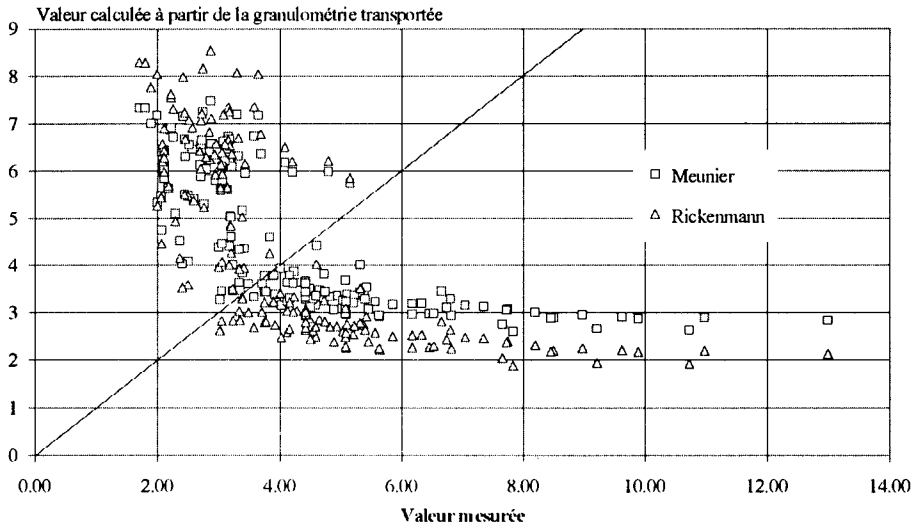


Figure 4-25 : Confrontation du calcul du coefficient de friction à partir des équations de MEUNIER ET DE RICKENMANN.

On retrouve, malgré l'ajout d'un nouveau paramètre, les mêmes tendances qu'avec les équations de SMART & JAEGGI. Il n'y a rien de surprenant à cela, les mesures de SMART & JAEGGI ayant servi de base à l'établissement de toutes ces formules. Il apparaît ainsi que l'écart ne provient pas de la façon de réaliser les ajustements mais plutôt d'une différence de phénomène physique.

4.5.1.4. Conclusion - physique des phénomènes

Il apparaît donc que les formules sont impuissantes à expliquer certaines évolutions. Or, la bonne concordance entre les résultats obtenues à partir de différentes formules basés sur des essais expérimentaux distincts - mais correspondant aux mêmes phénomènes physiques - montre qu'il est inutile de rechercher une formulation correspondant à ces essais proches du seuil de transport. Il est donc probable que d'autres paramètres interviennent pour expliquer l'évolution des conditions d'écoulement au cours de ces essais.

L'essai de formules "classiques" en hydraulique torrentielle a montré que :

- l'approche de Strickler n'est pas adaptée aux conditions d'écoulement dans les torrents.
- la submersion relative est un paramètre important des conditions d'écoulement, mais il ne suffit pas à expliquer toutes les variations.
- Dans aucune des formulations proposées, la granulométrie du lit n'est distinguée de celle de l'ensemble des matériaux. Cependant, les calculs ont montré que les résultats obtenus étaient nettement différents et qu'il était indispensable de faire un choix entre les granulométries. Or, l'application des formules ne permet pas d'établir une préférence.

Il apparaît deux phénomènes distincts :

- **Pour un fort transport solide** (plus de 1000 g/mn) les pertes de charge se décomposent en deux phénomènes :

- ♦ **L'énergie consommée par le lit.** Elle est considérablement réduite, le lit étant très fin. Cette tendance est renforcée par l'absence de structures morphologiques marquées dans le lit, la rugosité de forme étant alors très faible.
- ♦ **L'énergie servant au transport solide** qui semble secondaire.

Les lacunes de la formule de THOMPSON & CAMPBELL (1979) correspondent parfaitement à cette tendance. De même, l'utilisation de la formule de SMART & JAEGGI avec la granulométrie transportée conduit à un écoulement plus lent qu'en réalité car la faible granulométrie du lit n'est pas prise en compte. Cette tendance est confirmée par la formule de GRIFFITHS (1981), basée sur l'utilisation de la granulométrie du lit et qui prévoit un écoulement plus rapide que celui mesuré.

Finalement, lorsque le débit solide est important, l'écoulement est très rapide, le nombre de Froude dépassant largement l'unité. Dans ce cas, la rugosité "globale" est plus faible.

- **Lorsque le lit est pavé**, les pertes de charge sont causées par les gros éléments (la submersion relative est alors inférieure à l'unité) et surtout par les formes du lit (marches d'escalier en particulier). Ainsi, les formules de STRICKLER et de SMART & JAEGGI (avec la granulométrie transportée) conduisent à des surestimations très nettes de la vitesse par rapport aux valeurs mesurées.

Le nombre de Froude moyen se situe généralement légèrement en dessous de l'unité, conformément à la description des écoulements "troublés" de ZGHEIB (1990).

4.5.2. Formules de transport solide

Comme pour les conditions d'écoulement, les particularités du transport solide dans le cadre de ces essais vont être mises en évidence par confrontation des valeurs mesurées avec les formules classiques employées en torrent. Quatre formules seront testées afin de couvrir les différentes approches réalisées dans ce domaine :

- Formule de **MEYER PETER MULLER** (1949). Il s'agit de la formulation la plus répandue en France pour l'étude du transport solide par charriage. Elle a été établie pour des pentes inférieures à 2 % et une granulométrie uniforme. Elle est utilisée pour montrer les particularités du transport solide à forte pente.
- Formule de **SMART & JAEggi** (1983). C'est la formule de base utilisée pour le transport des matériaux à forte pente, puisqu'elle a été établie à partir d'essais allant jusqu'à 20 % de pente.
- Formule de **BATHURST** (1985). Cette formulation prend en compte le débit liquide unitaire. Il est possible par ce biais de ne pas considérer les conditions hydrauliques locales mais seulement le débit liquide unitaire.
- Formule de **SOGREAH** (1990). Cette formulation considère uniquement le débit liquide total sans considération de section mouillée. Cette formule est particulièrement facile d'emploi.

Il s'agit surtout de mettre en lumière les particularités de ces essais et de cerner les limitations des formulations actuelles. Il est probable qu'aucune de ces formules ne puisse rendre compte des phénomènes se produisant lorsque le pavage se forme. Là encore, les trois phases des essais ont été distinguées afin de mettre en évidence les particularités de chaque phénomène physique.

4.5.2.1. Formule de MEYER PETER

Cette formule s'écrit pour une densité apparente de 1.7 et un canal de 10 cm de largeur :

$$Q_s = 4000(hI - 0.0775d_m)^{3/2} \quad (\text{ en kg/s}) \dots\dots\dots (4-11)$$

On ne distingue pas le coefficient de Strickler du grain de celui du fond.

La figure suivante montre la confrontation du débit solide calculé par cette formule avec celui qui est mesuré. La lacune des formules de transport solide apparaît très nettement : quand le lit se pave, l'augmentation de la granulométrie ne suffit pas à expliquer la diminution ou même l'arrêt du transport solide.

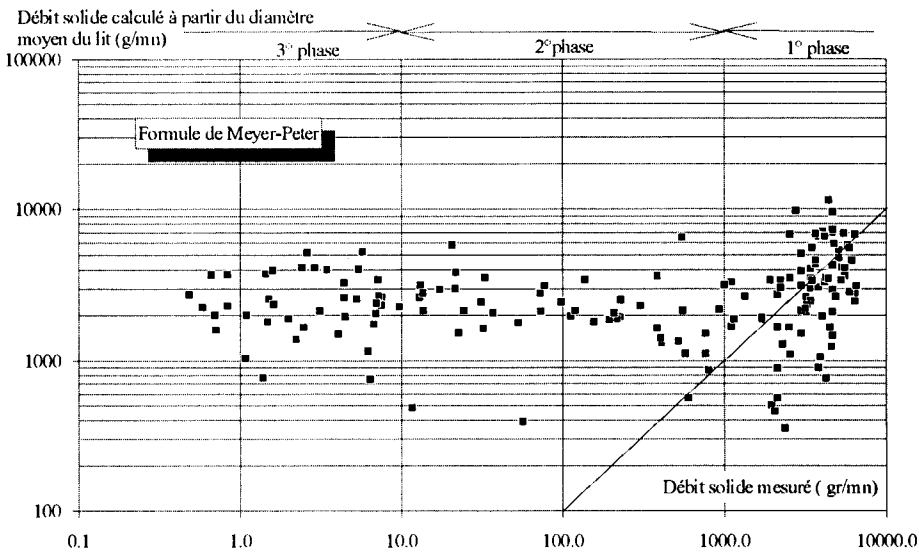


Figure 4-26 : Calcul du débit solide avec la formule de Meyer-Peter en considérant le diamètre moyen du lit.

D'autre part, même dans la zone de fort transport solide, la formule ne donne que partiellement satisfaction : lorsque la pente augmente, en particulier à cause de la faible submersion relative, les phénomènes changent de nature. Ainsi, la plupart des équations de transport solide surestiment le transport solide à forte pente¹³. Mais le rôle de la pente dans le transport solide est encore mal connu.

Une méthode pour rapprocher le calcul de l'observation consiste, lorsque le lit est pavé à prendre en considération le d_{90} à la place du d_m . La justification avancée consiste à dire que le transport solide ne commence que lorsque les grains les plus grossiers sont mis en mouvement.

La figure suivante montre que cette astuce permet en effet d'améliorer les résultats dans bien des cas, en particulier lorsque l'on se rapproche du seuil de début de mouvement. Cependant, le nombre de points apparaissant sur le graphique est bien inférieur. En effet, pour presque la moitié des points, le débit solide calculé est nul, ce qui n'est jamais vérifié sur le modèle. L'écart est alors considérable puisque le débit solide réel peut être de 100 g/mn alors que la formule ne prévoit aucun mouvement.

¹³ En fait, les équations de transport solide sont toujours calées avec pertinence sur les données utilisées. Cependant, la pente mais aussi une multitude d'autres paramètres comme la fourniture de matériaux, le pavage, la végétation, etc ... agissent tous dans le même sens : la diminution du débit solide. Ainsi, le débit solide est très généralement surestimé.

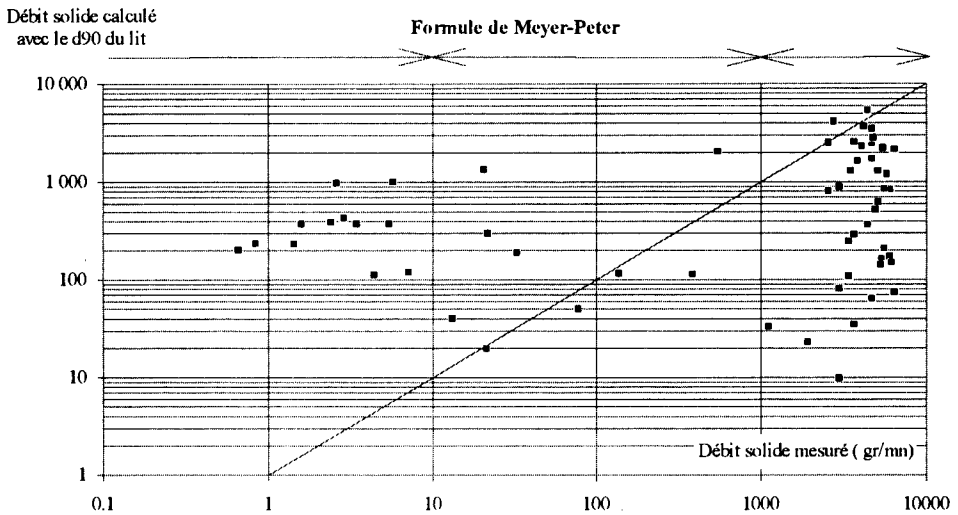


Figure 4-27 : Calcul du débit solide avec la formule de Meyer Peter en considérant le d_{90} du lit.

La granulométrie est donc un paramètre extrêmement influent sur la pertinence des calculs. D'autre part, un seuil de début de mouvement exprimé de façon aussi "brutale" ne peut convenir à des phénomènes se trouvant dans cette zone d'indétermination. On se rend compte ainsi des lacunes présentées par les formules considérant un seul diamètre représentatif : elles sont incapables de prévoir la souplesse du comportement d'une granulométrie étendue soumise à un écoulement.

4.5.2.2. Formule de SMART & JAEGGI

Cette formule a été obtenue à partir d'essais visant un régime permanent de charriage avec recyclage des éléments transportés et de fortes pentes. *A priori*, elle est donc bien adaptée à la première phase de ces essais. Le graphique suivant situe le domaine de ces essais par rapport à celui des expériences de SMART & JAEGGI¹⁴.

Il apparaît que la submersion relative est beaucoup plus faible dans le cas des expériences réalisées ici. Cette particularité est directement liée à l'objectif des expérimentations : pour une pente donnée, lorsque l'on s'approche du débit critique, la hauteur d'eau est forcément très réduite.

¹⁴ Les points se rapprochent d'une droite. En effet, la hauteur d'eau joue un rôle identique dans la contrainte de cisaillement et dans la submersion relative alors que pente et granulométrie varient peu.

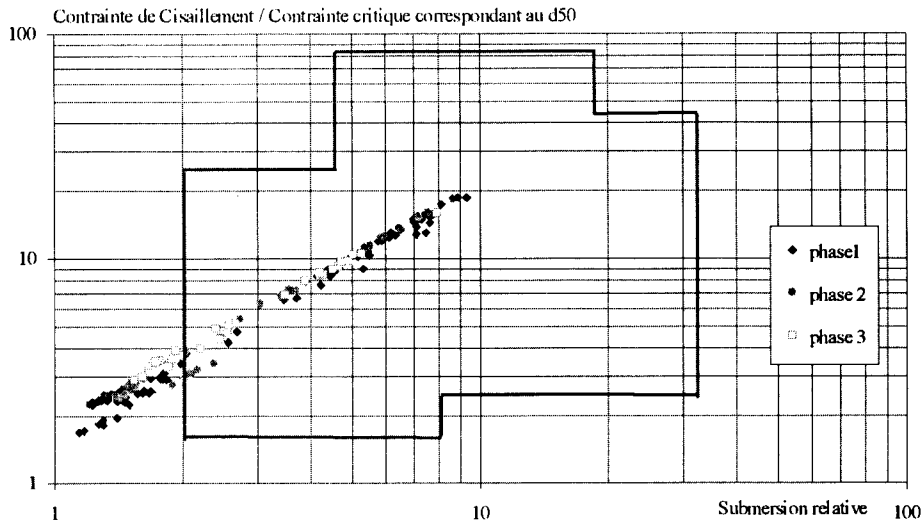


Figure 4-28 : Situation des essais réalisés par rapport au domaine couvert par les expériences de SMART & JAEGLI.

Cette formule s'exprime :

$$\frac{q_s}{q} = 4 \frac{s}{(s-1)} \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} I^{1.6} \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau} \right) \dots \dots \dots (4-12)$$

Un calcul classique, basé sur le d_m du lit, a été conduit et ne montre pas de changement significatif par rapport à l'application de la formule de Meyer Peter comme le montre la figure ci dessous.

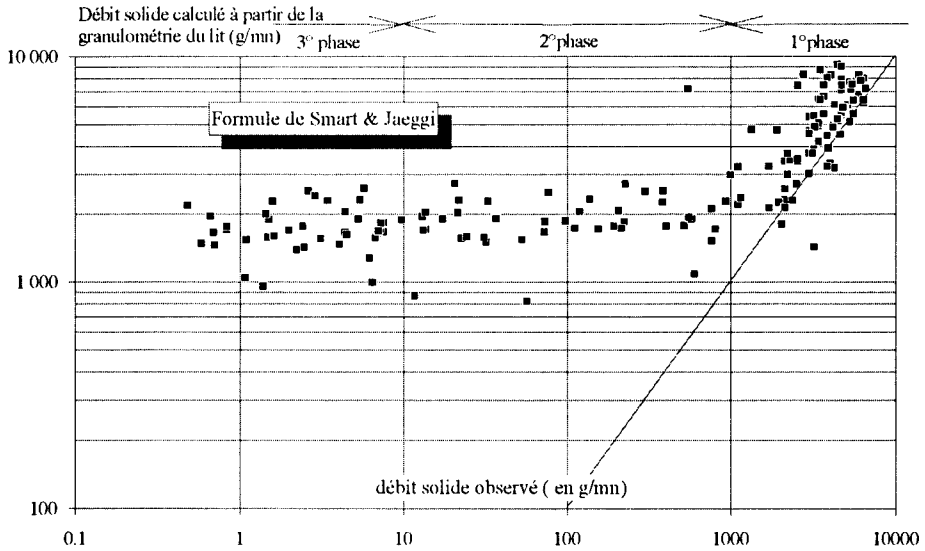


Figure 4-29 : Calcul du débit solide par la formule de SMART & JAEggi à partir de la granulométrie du lit.

Il apparaît que dans la phase de fort transport solide, la tendance est bien la même pour les valeurs calculées et celles qui ont été mesurées. Ainsi, la formule de SMART & JAEggi présente une bonne reproduction de la réalité tant que le débit solide est supérieur à 1000 g/mn.

Par contre, pour des débits inférieurs, il apparaît clairement que la formule n'utilise pas les bons paramètres explicatifs, car d'autres phénomènes entrent en jeu.

Un second calcul a été réalisé en considérant seulement la granulométrie transportée lorsque le transport solide est élevé. Cependant, cette méthode conduit à un paradoxe : au début de l'essai, dans la zone de fort transport solide, l'évacuation des éléments de taille moyenne conduit à une nette augmentation du d_m de la granulométrie transportée. Dans ce cas, la contrainte critique n'est pas atteinte et la formule correspond à un transport solide nul.

Cet exemple montre que, pour ces essais, l'utilisation de la granulométrie transportée en régime transitoire dans une telle formule n'est pas conforme à l'approche suivie par les auteurs¹⁵ qui ont considérés la granulométrie de base⁰ des essais. Il est donc préférable d'utiliser la granulométrie du lit.

¹⁵ Il faut noter qu'au cours de ces expériences, la granulométrie du lit et celle des matériaux transportés n'avaient pas été différenciées car l'étude portait sur le charriage hyperconcentré en régime permanent -donc sans tri granulométrique.

Ce choix semble surprenant dans la mesure où il correspond à un transport solide intense. Il peut s'expliquer de deux façons :

- Le débit solide est d'autant plus important que les matériaux - donc l'eau - se déplacent rapidement. Dans ce cas, un lit constitué de matériaux fins, en présentant une rugosité plus faible, facilite le transport.
- Dans le cadre de ces essais, la granulométrie du lit peut être seulement un indicateur de l'avancement de l'essai.¹⁶ Dans ce cas, le gain obtenu en considérant la granulométrie du lit est peut être seulement lié au processus opératoire.

4.5.2.3. Formule de BATHURST

Pour prendre en compte la difficulté de calculer la contrainte de cisaillement dans un lit à forte pente, et étant donné son manque de représentativité physique, BATHURST & AL. (1985) considèrent le débit liquide unitaire, pour un matériau uniforme et des pentes comprises entre 0.25 et 25 %. Il exprime le débit solide par :

$$q_s = \frac{2.5}{s} I^{3/2} (q - q_c) \dots \dots \dots (4-13)$$

avec

$$q_c = 0.15 I^{-1.12} \sqrt{g} d_{50}^{3/2} \dots \dots \dots (4-14)$$

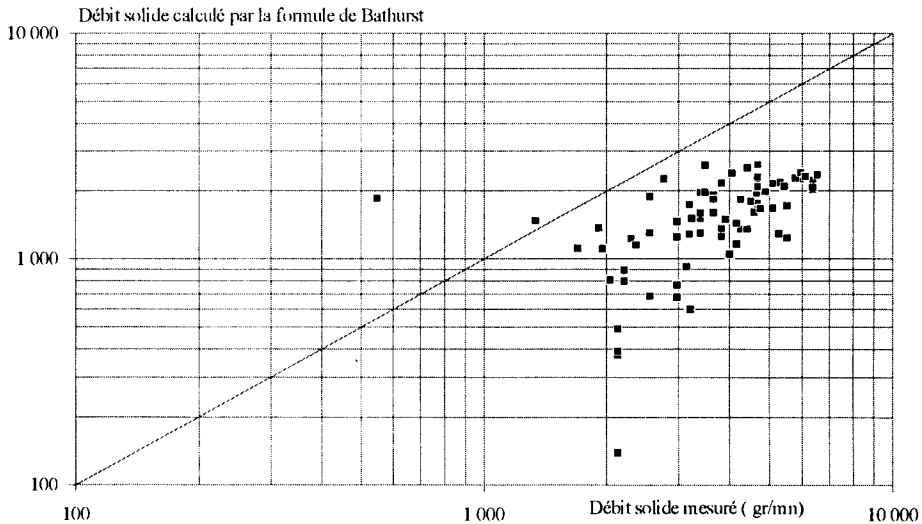


Figure 4-30 : Calcul du débit solide au moyen de la formule de BATHURST et al. en utilisant le d_{50} du lit.

¹⁶ En effet, pour cette famille d'essais, tous les paramètres sont liés à la granulométrie mais aussi au temps et au débit solide. Il est quelquefois difficile de savoir si la liaison entre deux paramètres correspond à une réalité physique ou si elle est seulement liée au déroulement de l'essai. C'est une difficulté importante pour cette série d'essais. Les conditions expérimentales étant très proches dans tous les cas, il devient difficile de ne prendre en considération que les corrélations "physiques" et d'écartier les liaisons engendrées uniquement par le processus opératoire.

On trouve que la formulation de BATHURST et al. sous estime systématiquement le débit solide. Cette constatation est en accord avec les travaux de TAKAHASHI (1987) qui notait que cette formule sous estimait le débit solide au-dessus de 10% de pente.

4.5.2.4. Formule de SOGREAH

La quatrième formule utilisée est celle établie par SOGREAH. Basée sur l'expression de SMART & JAEGGI et sur les considérations de RAMETTE (1981) concernant les proportions de la section mouillée, elle conduit à l'expression suivante :

$$\frac{Q_s}{Q} = 4.45 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \frac{\rho}{\rho_s - \rho} I^{1.5} \left(1 - \left(\frac{Q_{lc}}{Q} \right)^{0.375} \right) \dots\dots\dots (4-15)$$

avec

$$\frac{Q_{lc}}{\sqrt{gd_m^5}} = 0.0776(s-1)^{8/3} I^{-13/6} (1-1.2I)^{8/3} \dots\dots\dots (4-16)$$

La figure suivante permet de confronter les valeurs mesurées avec celles observées.

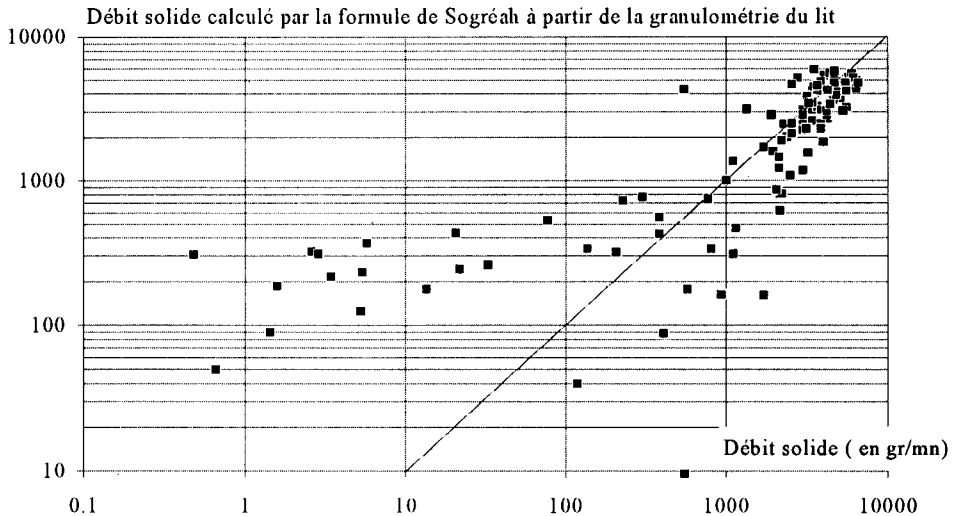


Figure 4-31 : Débit solide calculé par la formule de Sogreah en considérant la granulométrie du lit.

Il apparaît évidemment que la tendance générale est la même que celle de la formulation de SMART & JAEGGI. Cependant, il semble que cette formule reste valable pour un débit solide un peu plus faible (plus de 100 g/mn).

Cette amélioration s'explique par la très faible vitesse d'augmentation du débit solide lorsque le seuil de début de mouvement est dépassé. Il est alors possible de diminuer ce seuil sans que la pertinence de la formule soit amoindrie lors des forts transports solides.

Dans la phase de pavage à très faible transport solide, les valeurs calculées diminuent lorsque le débit solide décroît mais l'écart devient de plus en plus considérable. Cet

écart peut s'expliquer par le rôle plus important de la granulométrie dans le seuil de début de transport. L'écart dans cette zone est encore beaucoup plus faible même s'il atteint encore 10^2 . Il reste clair que cette formule, comme les précédentes, n'est pas adaptée au transport solide à proximité du début d'entraînement.

Cependant, de très nombreux calculs fournissent un débit solide négatif (en fait, le seuil de début de transport n'est pas atteint). La figure correspond aux valeurs pour lesquelles le seuil de début de transport calculé par la formule est supérieur au débit liquide appliqué durant l'essai :

Débit solide calculé lorsque le seuil de début de mouvement n'est pas atteint

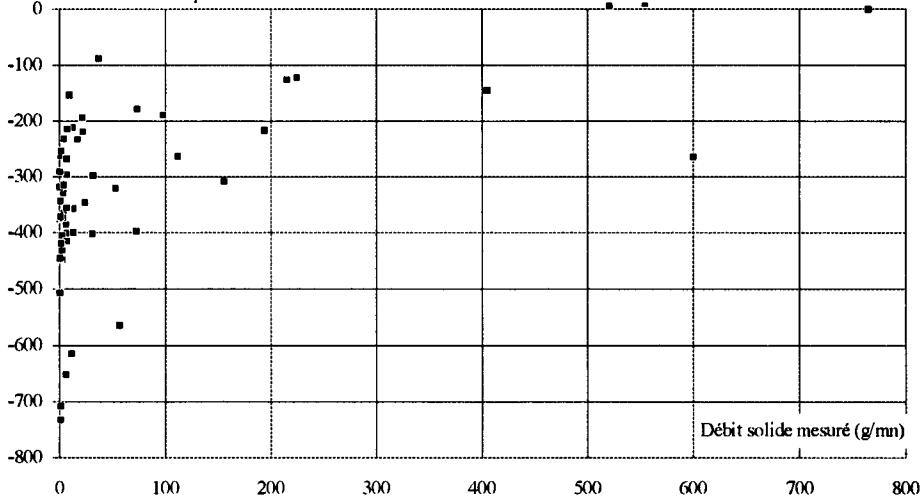


Figure 4-32 : Débit solide calculé par la formule de Sogreah lorsque le seuil de début de mouvement calculé n'est pas atteint.

Ainsi, un meilleur ajustement de la formule de début de mouvement, si elle améliore les calculs lorsque le transport solide est élevé, ne permet pas de suivre un phénomène différent comme le lessivage.

Ces calculs ont été réalisés en considérant la granulométrie du lit. Les tentatives en considérant la granulométrie transportée n'ont apporté aucune amélioration. En effet, le débit solide calculé se stabilise aux environs de 2000 g/mn lorsque le lit commence à se former.

4.5.2.5. Conclusion

L'application de ces formules a confirmé que le **transport solide loin du seuil de transport** est relativement bien connu, même pour des pentes supérieures à 10%. Le rapport entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées oscille entre 1 et 2. Le phénomène prépondérant est alors la limitation du transport par l'écoulement. Dans un tel cas, la capacité maximale de transport est atteinte : on parle de transport solide équilibré.

Il convient de noter qu'ici tous les paramètres (en particulier les granulométries) sont connus avec une bonne précision. Dans le cas d'applications au terrain, l'incertitude au

niveau des grandeurs mises en jeu entraîne des écarts sans doute beaucoup plus importants.

Au contraire, rien ne permet actuellement de cerner les conditions de **transport solide à proximité du seuil de début de mouvement**. Lorsque l'écoulement est moins vigoureux, l'arrachement des grains et la fourniture des matériaux apparaissent comme les phénomènes prépondérants. Dans ce cas, aucune formulation ne considère les paramètres explicatifs de ce type de transport solide : les écarts entre les formulations et les mesures sont tels qu'il ne fait aucun doute sur la différence des phénomènes. Ainsi, les graphiques précédents montrent que, lorsque le débit mesuré diminue, le lien avec la valeur calculée disparaît et la dispersion augmente.

Des tentatives, basées sur les paramètres globaux du lit (granulométrie, pente, vitesse et hauteur d'eau, etc...), ont montré que l'explication des phénomènes est nettement plus compliquée et qu'il n'y a pas univocité entre les caractéristiques d'ensemble et le transport solide.

Il semble donc que le transport solide doit être considéré à partir de nouveaux concepts et non plus à partir d'une extrapolation des formulations actuelles. Il est probable qu'il soit nécessaire de prendre en considération le stock de matériaux mobilisables dans le lit.

En effet, lorsque les éléments structurants sont en place, les grains dissimulés derrière sont mis en mouvement non pas par dépassement de la contrainte de cisaillement globale, mais par les fluctuations turbulentes derrière les obstacles. La quantité de matériaux mobilisables dépend donc du volume disponible derrière les grands éléments mais aussi de leur taux de remplissage. Or celui-ci est lié directement à l'historique des écoulements et à la nature des transports solides.

4.6. Paramètres d'étude de la mobilité des grains

Un des objectifs de ce travail étant d'étudier le comportement d'une classe granulométrique par rapport aux autres, il est nécessaire de définir des paramètres quantifiant ces évolutions. Deux approches ont été conduites pour étudier le comportement de la granulométrie :

- La première, proche des formulations classiques, consiste à étudier la mobilité des grains par rapport à une expression du coefficient de masquage,
- La seconde, plus générale, définit un **indice de mobilité relative** indépendant des formules existantes mais ne permettant de comparer le mouvement d'une taille de grains que par rapport à l'ensemble des matériaux.

4.6.1. Utilisation du coefficient de masquage

L'étude bibliographique a montré que l'étude des matériaux de granulométrie étendue était souvent réalisée en adaptant une formule établie en granulométrie resserrée à chaque classe granulométrique puis en ajoutant un coefficient multiplicatif pour tenir compte de la situation de la classe granulométrique par rapport à l'ensemble du matériau.

Dans ce cas, si une formule de transport solide pour l'ensemble du matériau peut s'exprimer par :

$$Q_s = f (CH, CH_0, \text{granulo}) \dots\dots\dots(4-17)$$

avec CH : conditions hydrauliques (pente + débit ou contrainte de cisaillement par exemple).

CH₀ : conditions hydrauliques de début de mouvement.

granulo : paramètres granulométriques (par exemple d₃₀, d₅₀, d₉₀) du matériau.

La démarche classique consiste à l'adapter à une granulométrie étendue au moyen du coefficient de masquage (CM) par :

$$Q_{si} = f (CH, CH_0, \text{granulo}, d_i, CM(d_i)) \dots\dots\dots(4-18)$$

L'indice i indique que le calcul est réalisé pour chaque classe granulométrique. Le coefficient de masquage doit alors être représentatif des évolutions et des interactions entre les différentes classes. C'est évidemment le point faible de ces formulations et il n'a pas encore été possible de dégager les paramètres explicatifs de ce coefficient.

La démarche classique, suivie par PARKER & al. (1982), ANDREWS (1983), RAHUEL (1988), SILVIO & PEVIANI (1989) - entre autres - consiste à retenir l'expression suivante :

$$CM(d_i) = \left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^\alpha \dots\dots\dots(4-19)$$

La démarche proposée ici consiste à étudier le coefficient de masquage en inversant la formule 4-18. On obtient alors l'équation suivante :

$$CM(d_i) = f^{-1} (Q_{si}, CH, CH_0, \text{granulo}, d_i) \dots\dots\dots(4-20)$$

On a alors la possibilité de suivre l'évolution des mouvements de chaque classe granulométrique en dégagant les variations des autres paramètres au moyen des formules de transport solide.

Cette démarche présente cependant deux inconvénients :

- Aucune formule de transport solide ne permet de suivre de façon satisfaisante les évolutions du transport solide durant les essais. Ainsi, leur utilisation, même si elle ne sert qu'à étudier le comportement d'une classe granulométrique par rapport à une autre, est douteuse et ne permet pas vraiment de s'affranchir de l'évolution des paramètres hydrauliques.
- D'autre part, ce traitement est relativement complexe, dans la mesure où il est nécessaire de calculer d'abord le seuil de début de mouvement pour l'ensemble des grains, puis de le réutiliser dans la formule pour calculer à nouveau le coefficient de masquage de chaque classe granulométrique. Finalement, il présente une certaine opacité, et l'utilisation des résultats n'est pas toujours très facile.

Des calculs basés sur le coefficient de masquage ont cependant été réalisés en se basant sur l'équation de SOGREA. Les résultats n'ont apporté aucun élément nouveau par rapport à l'approche basée sur l'indice de mobilité relative d'utilisation plus simple.

Ils sont présentés à l'annexe I.

4.6.2. Définition de l'indice de mobilité relative

Cette méthode considère uniquement la probabilité qu'un grain d'une classe granulométrique d'être arraché du lit en une seconde. Seuls les arrachements conduisant le grain à l'extérieur du modèle sont pris en compte. Les processus de reprise - dépôt ne sont pas comptabilisés dans cette démarche.

Cette différence n'est importante que dans le cas d'un modèle long ou large, ce qui n'est pas le cas ici. On peut cependant penser que la probabilité réelle d'être remis en mouvement - éventuellement pour un court trajet - est 3 à 8 fois plus importante sur le canal étroit, les sauts effectués dans la phase de pavage étant de l'ordre de quelques dizaines de cm. Il semble cependant que la longueur des déplacements augmente avec le débit solide.

Cette méthode présente l'avantage de ne pas nécessiter d'hypothèse sur l'équation de transport solide. La probabilité d'arrachement en un pas de temps est égale au rapport du débit solide de la classe i par la masse de la classe i dans la couche active :

$$p_i = \frac{Q_{si}}{\Delta t M_i} = \frac{Q_{si}}{\Delta t \rho_s n L B E a_i} \dots\dots\dots (4-21)$$

avec

- M_i : masse de la classe i dans la couche active
- L : longueur du canal
- a_i : fréquence de la classe i dans la couche active
- n : indice de porosité de la couche active (on a considéré $\rho_s n = 1.7$)
- Δt : pas de temps considéré

On le voit cette approche est directement liée à l'hypothèse de la couche active^d. Il est donc nécessaire d'effectuer deux calculs suivant que l'on considère une épaisseur finale

de la couche active de 1 ou de 1,5 d_{90} . On verra que l'écart entre les deux hypothèses n'est pas significatif.

On peut définir de la même façon la probabilité de mouvement de l'ensemble des matériaux :

$$p = \frac{Q_s \Delta t}{M} = \frac{Q_s \Delta t}{\rho_s \cdot n \cdot L \cdot B \cdot E} \dots \dots \dots (4-22)$$

M masse totale de la couche active

La figure suivante montre l'évolution de la probabilité d'arrachement dans le cas d'une couche active de 1,5 d_{90} . Il apparaît nettement que les très fortes variations de ce paramètre sont directement liées au transport solide. Cette constatation n'est pas surprenante car les variations du débit solide sont près de mille fois supérieures à celles du pourcentage d'éléments de chaque classe granulométrique.

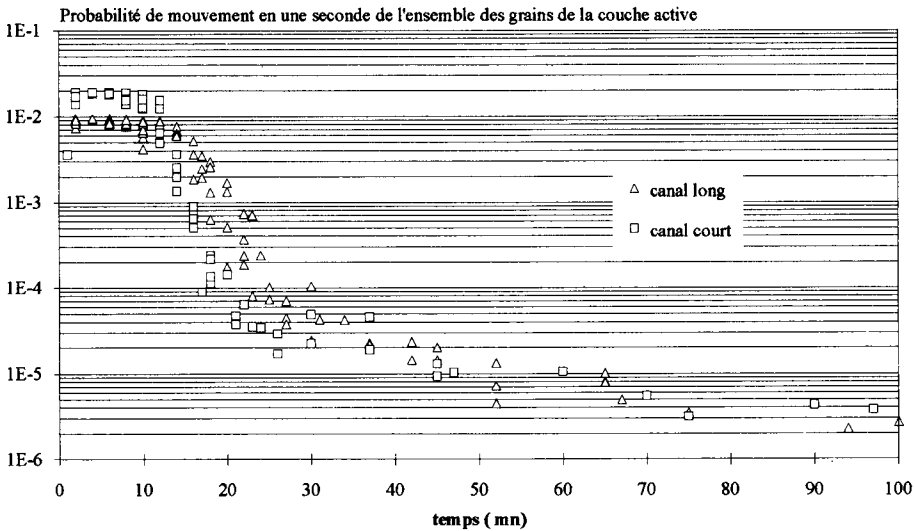


Figure 4-33 : Evolution de la probabilité de mouvement d'un grain de la couche active.

Ce calcul de probabilité peut être extrapolé durant les 10 premières minutes de l'essai : malgré l'injection de matériaux, il est légitime de ne pas distinguer les matériaux venant de l'amont de ceux issus de la surface du lit¹⁷.

Cependant, la figure précédente montre que cette approche n'est vraiment significative que lorsque le lit limite le transport solide. Ainsi, dans la première phase des essais, le transport solide est limité par l'écoulement et est indépendant du lit. On obtient alors une probabilité de mouvement inversement proportionnelle à la surface du lit.

¹⁷ En effet, on peut concevoir qu'un grain apporté à l'amont du modèle, même lorsque le transport solide est maximal, ne transite pas directement jusque vers l'aval du modèle mais s'arrête dans la couche active. Cette remarque montre cependant que la distinction entre les éléments sur et dans le lit est nécessaire, mais qu'elle n'est absolument pas évidente dans le cas d'un charriage hyperconcentré.

La figure suivante montre les mêmes paramètres que précédemment mais dans le cadre d'une épaisseur initiale de la couche active égale au d_{90} du matériau de base¹⁸. Etant donnée l'amplitude des variations, aucune différence significative n'apparaît. On constate à nouveau que le choix de l'épaisseur initiale de la couche active a peu d'influence sur les calculs qui découlent de cette hypothèse.

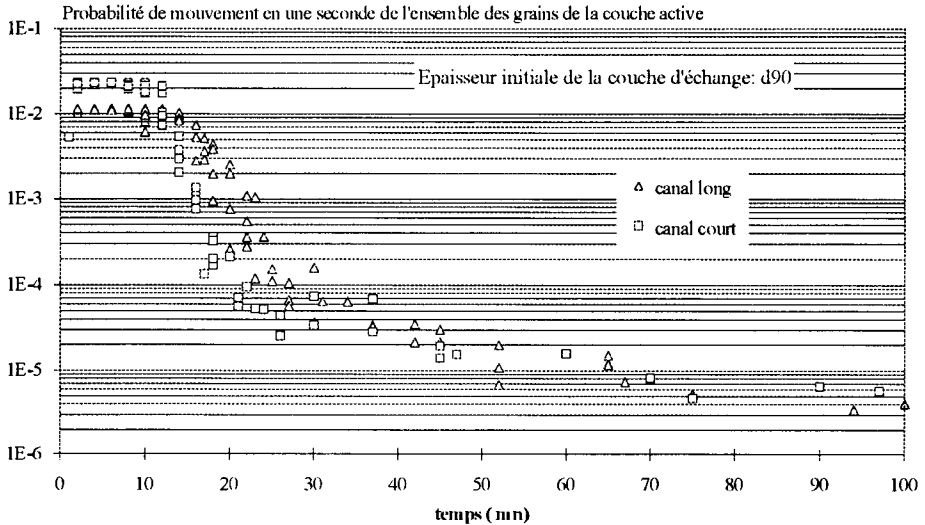


Figure 4-34 : Calcul de la probabilité de mouvement avec une épaisseur de la couche active égale au d_{90} .

Evidemment, les évolutions des probabilités de mouvement de chaque classe granulométrique suivent aussi des évolutions de 1 à 10^5 , c'est à dire beaucoup trop importantes pour pouvoir être facilement utilisées.

Un des objectifs de cette étude étant de comparer le comportement d'une classe granulométrique aux autres, il semble fructueux de définir un indice de mobilité relative moins variable et répondant à ces objectifs. D'où la définition suivante :

$$m_i = \frac{p_i}{p} = \frac{Q_{si}}{a_i Q_s} = \frac{1}{a_i} \frac{Q_{si}}{Q_s} = \frac{t_i}{a_i} \dots \dots \dots (4-23)$$

Avec t_i : fraction de la classe i dans la granulométrie transportée.

Ce paramètre indique la mobilité des éléments de la classe i par rapport à l'ensemble des matériaux :

- $m_i < 1$, la classe i est moins mobile que la moyenne des autres classes.
- $m_i = 1$, la classe i a le même comportement que la moyenne des autres classes.
- $m_i > 1$, la classe i est plus mobile que la moyenne des autres classes.

¹⁸ L'épaisseur de la couche active est en effet définie par $\frac{E}{d_{90}} = \frac{E_0}{d_{90}} + \beta q_{1st}^2$.

Ce choix est expliqué au paragraphe 3.3.3.3. Les calculs ont été arbitrairement conduit avec $E_0 = 1.5 d_{90}$, mais il est nécessaire de vérifier que ce choix n'influence pas les résultats obtenus.

L'indice de mobilité relative a permis - après ajustement - de construire un modèle numérique reproduisant l'évolution du lit.

Ce modèle - qui n'est évidemment valable que dans le cadre restreint de ces essais - est décrit à l'annexe IV.

4.6.3. Réduction du nombre de classes granulométriques

Les mesures ont été réalisées en distinguant 12 classes granulométriques. Cependant, pour faciliter l'interprétation, il est souhaitable de réduire le nombre de classes considérées. En effet, un premier traitement a été réalisé en considérant toutes les classes. Il est alors apparu qu'il n'y avait pas de changement brutal de comportement d'une classe à l'autre mais que l'évolution était assez continue lorsque la taille des grains évolue.

La courbe granulométrique a été décomposée en seulement trois classes. Les bornes de chacune des trois classes principales ont été fixées en fonction du comportement des grains. Ainsi, deux groupes apparaissent nettement : les éléments qui deviennent de plus en plus nombreux dans le lit au fur et à mesure de la formation du lit et les classes dont les effectifs s'appauvrissent.

La figure suivante montre la différence de comportement autour de la taille charnière de 0.25 cm : les éléments de taille comprise entre 0.25 et 0.4 cm voient leurs effectifs augmenter dans le lit au cours de la formation du pavage alors que les éléments de 0.16 à 0.25 cm enregistrent une légère diminution de leur pourcentage. Cependant, comme on l'a dit précédemment, il n'y a pas d'évolution très marquée d'une classe à l'autre, et l'écart entre ces deux classes est sensible mais peu important.

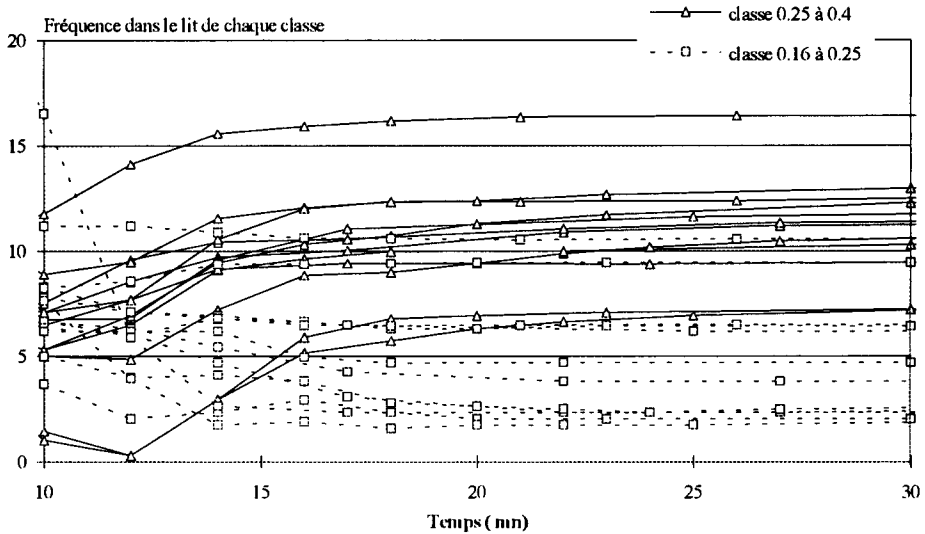


Figure 4-35 : évolution de la fréquence des classes 0.16 - 0.25 et 0.25 - 0.40 en fonction du temps.

La valeur de 0.25 cm correspond donc bien à un changement de comportement. Il s'agit d'une valeur comprise entre le d_{50} et le d_{60} de la granulométrie de base.

On retrouve là une hypothèse courante : la mobilité d'une granulométrie étendue est identique à celle des grains de taille un peu supérieure au d_{50} . Ainsi, cette constatation est tout à fait en accord avec les résultats obtenus sur ce modèle.

Finalement, les douze classes granulométriques sont réparties suivant trois groupes :

Eléments grossiers	Eléments moyens	Eléments fins
1.5 cm	0.25	0.063
		0.01 cm

Il faut noter qu'il n'y a pas de différence nette entre le comportement des éléments moyens et celui des fins. Cette décomposition permet cependant de montrer le dégradé du comportement des matériaux en fonction de la taille des éléments. Cependant, pour affiner l'analyse, la classe granulométrique des grains de plus de 1 cm de diamètre sera quelquefois utilisée.

La figure suivante montre l'évolution des indices de mobilité pour les trois classes granulométriques retenues en fonction du temps pour tous les essais.

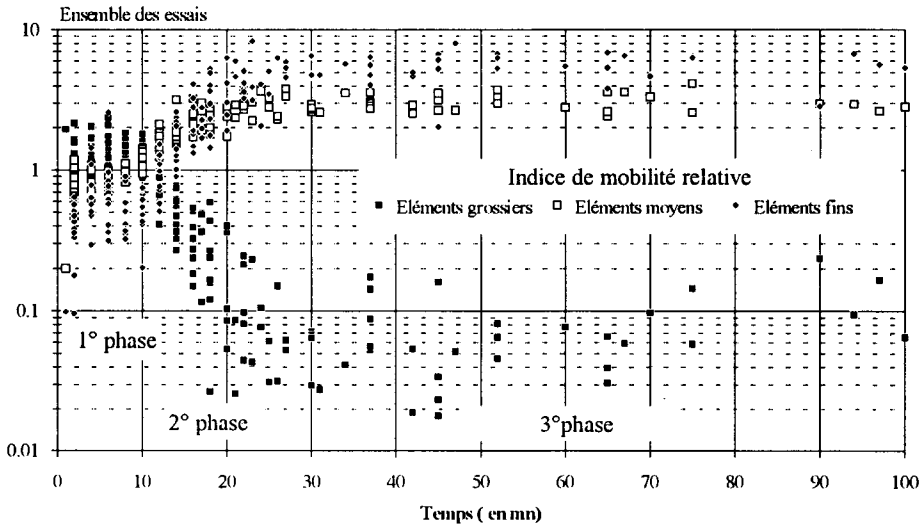


Figure 4-36 : Evolution de l'indice de mobilité relative en fonction du temps pour l'ensemble des essais.

La différence de comportement des matériaux grossiers apparaît très nettement. D'autre part, les trois premières phases des essais préalablement décrites sont nettement distinctes. C'est l'étude détaillée de chacune de ces phases qui est maintenant proposée.

4.7. Première phase : capacité limite de transport

4.7.1. Evolution du débit solide

La figure ci-dessous montre que le débit solide diminue linéairement durant la première phase¹⁹.

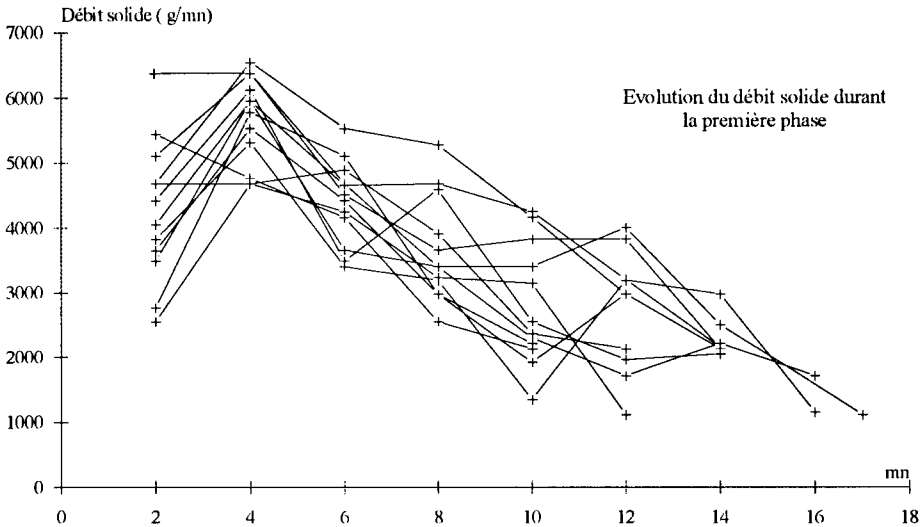


Figure 4-37 : Débit solide durant la première phase.

Il apparaît nettement une décroissance linéaire en fonction du temps, à l'image du débit liquide durant les dix premières minutes. Le débit solide observé a été comparé avec celui calculé à partir de l'équation de MEUNIER (1989) concernant le charriage hyperconcentré :

$$Q_s = 6.3 Q I^2 \dots\dots\dots (4-24)$$

¹⁹ La première valeur (à 2 mn) correspond à la mise en régime du modèle et il est difficile de savoir si cela correspond à un retard du circuit hydraulique, à un temps de propagation des matériaux en aval du modèle ou à la difficulté de "mise en route" du transport solide.

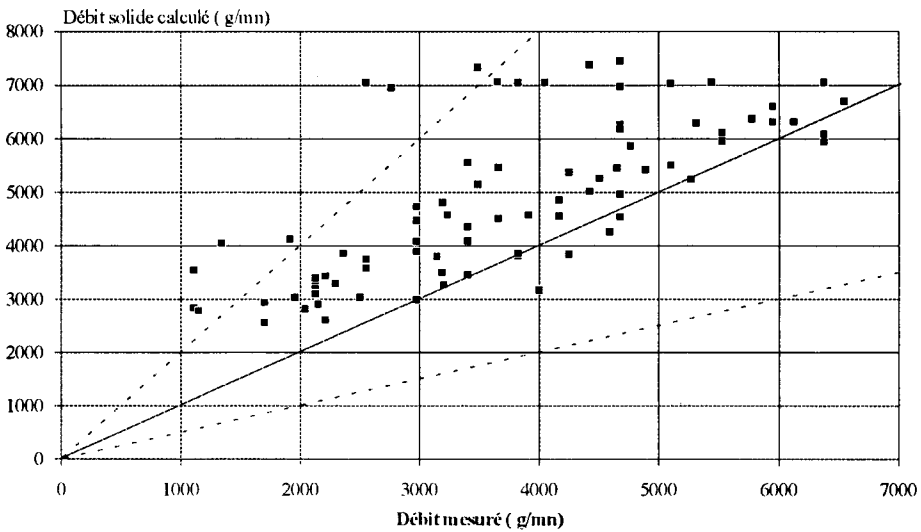


Figure 4-38 : Confrontation du débit solide mesuré avec la formule de MEUNIER.

Il apparaît que l'on retrouve une précision "hydrologique" puisque la plupart des débits calculés sont compris entre la moitié et le double de la valeur mesurée.

La formule a cependant une tendance assez marquée à surestimer le débit solide. Ce faible écart peut être expliqué par la relative faiblesse de la contrainte de cisaillement par rapport aux essais de SMART & JAEGGI. Cet écart est donc directement lié à l'absence de seuil de mouvement dans la formule. Cependant il n'y a pas de tendance marquée ni de dérive en fonction du débit solide.

4.7.2. Evolution granulométrique

Les figures 4-13, 4-14 et 4-16 montrent l'évolution de la granulométrie pour chaque essai indépendamment. Cette phase se caractérise essentiellement par le faible tri granulométrique lié au charriage. La figure suivante exprime le rapport du d_{90} transporté par le d_{90} de la granulométrie de base en fonction du débit solide. Tout indique que l'on se trouve très nettement dans la zone de charriage hyperconcentré.

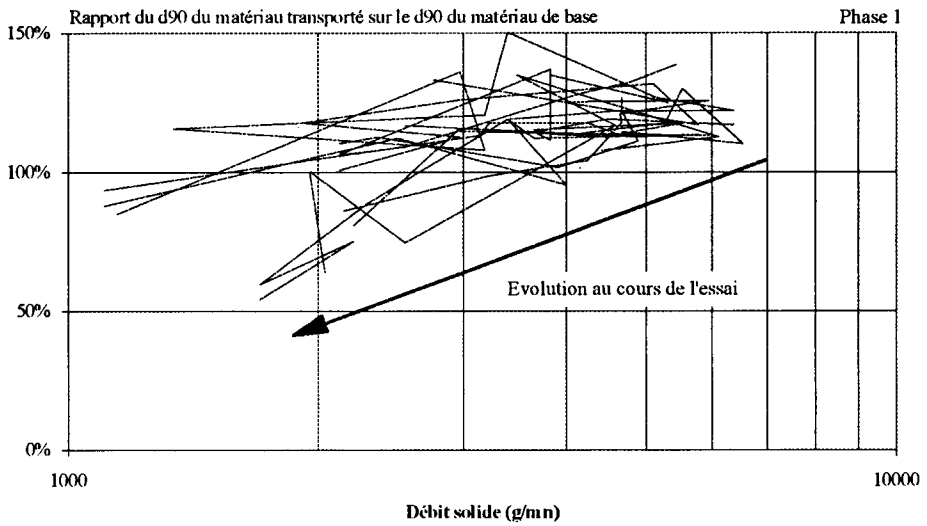


Figure 4-39 : Rapport du d_{90} transporté par le d_{90} du matériau de base en fonction du débit solide.

Il apparaît nettement que les matériaux sortant sont plus grossiers que le matériau de base. Cette évolution est encore accentuée dans le cas des déciles inférieures (d_{50} et d_{30}).

La granulométrie du lit suit une évolution cohérente avec celle des matériaux transportés comme le montre la figure suivante :

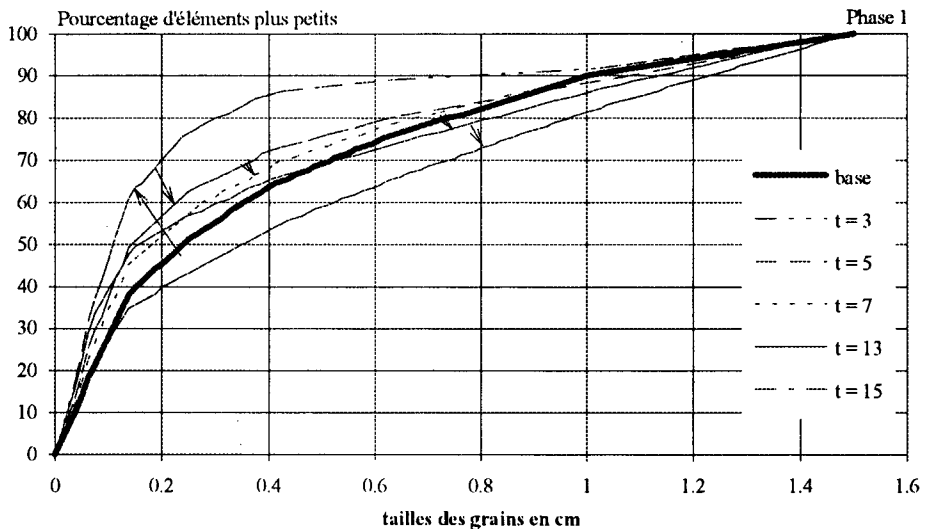


Figure 4-40 : Granulométrie du lit durant l'essai 5.

Les flèches correspondent à l'évolution en fonction du temps.

Il se produit donc un affinement du lit, l'effectif des éléments de moins de 0.2 cm augmentant de 75 %. Au contraire, la fraction d'éléments grossiers évolue peu durant cette phase.

Pour mieux comprendre les évolutions du tri granulométrique, il est nécessaire de calculer les indices de mobilité pour les trois classes granulométriques principales. La figure suivante reproduit le résultat de ces calculs dans le cas d'une couche active d'épaisseur initiale de $1.5 d_{90}$.

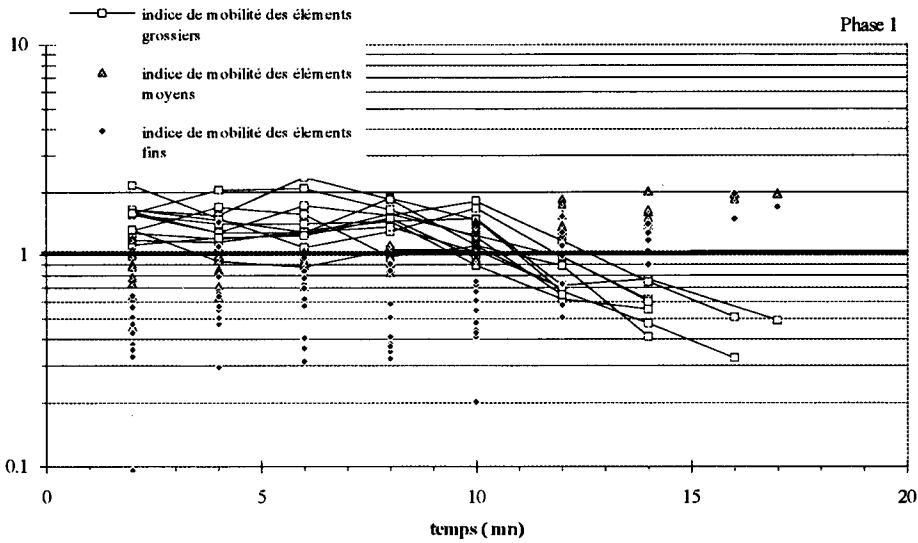
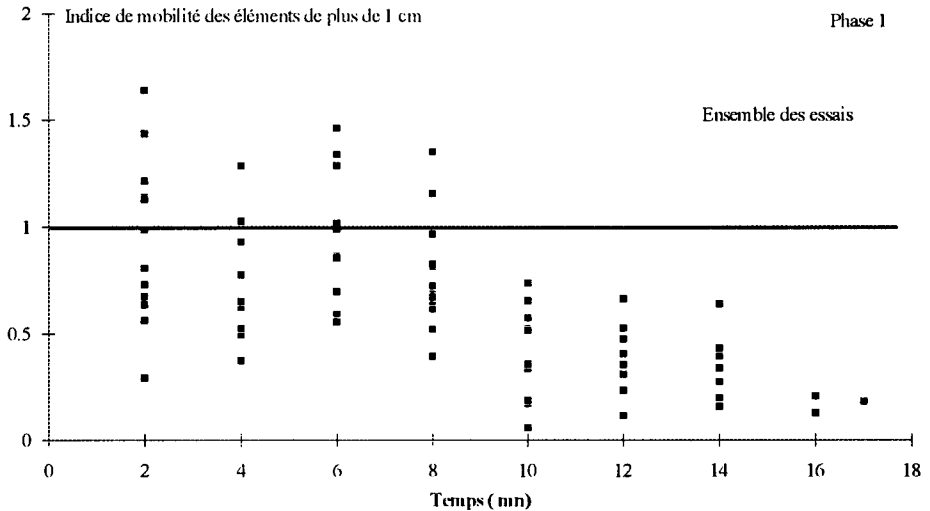


Figure 4-41 : Indices de mobilité relatifs pour l'ensemble des essais.

La différence de comportement des éléments grossiers apparaît nettement : leur mobilité est nettement supérieure à l'ensemble des grains. Il s'agit cependant d'une valeur faible car le débit solide étant très élevé durant cette phase, il ne peut y avoir un tri granulométrique très marqué.

En effet, un fort écart de mobilité dans une période de fort débit solide conduit très rapidement à l'érosion d'un volume considérable d'éléments mobiles et un dépôt aussi important d'éléments peu mobiles. Généralement, le lit ne peut stocker - ou fournir - de grandes quantités de matériaux d'une classe granulométrique. Ainsi, la granulométrie du matériau transporté est très proche de celle du matériau fourni à l'écoulement.

Cette approche doit cependant être tempérée par l'étude de l'indice de mobilité relative de la classe la plus grossière (plus de 1 cm). La figure suivante montre en effet que ces blocs sont plutôt moins mobiles que l'ensemble des matériaux.



D'autre part, il apparaît une très forte dispersion. Il semble que trois éléments peuvent expliquer cette dispersion :

- Les erreurs de mesures sont maximales en début d'essai, en particulier à cause du manque de maîtrise de la granulométrie initiale de la surface du lit. En effet, il suffit de trop vibrer le lit lors de la mise en place des matériaux pour obtenir une surface plus grossière. Le calcul de l'indice de mobilité relative est alors largement faussé pour la classe granulométrique la plus grossière. Cet écart est cependant très rapidement gommé.
- Le déplacement des blocs est beaucoup moins régulier que celui des éléments de taille moyenne. Il présente donc une dispersion plus importante que celle que l'on obtient avec des classes granulométriques plus larges. Cette caractéristique est directement en rapport avec la morphologie durant l'essai.
- Les éléments grossiers, intrinsèquement plus difficiles à déplacer, sont plus sensibles aux fluctuations des conditions hydrauliques.

4.7.3. Morphologie

La morphologie observable durant la première phase est particulièrement sommaire. En effet, on se trouve dans la zone de "fonctionnement" correspondant à un "lit plat de transition" ou de début de formation des antidunes, le nombre de Froude étant généralement compris entre 1 et 2 durant cette phase.

D'autre part, l'écoulement est réellement monodimensionnel durant cette phase puisque le débit liquide est élevé. Il n'y a donc pas beaucoup de possibilités de développement de structures morphologiques car seul le profil en long peut varier. Or le moindre amas se traduit par une augmentation de la pente locale et un accroissement des contraintes hydrauliques. La figure suivante est une photo du lit durant la première phase d'un essai.

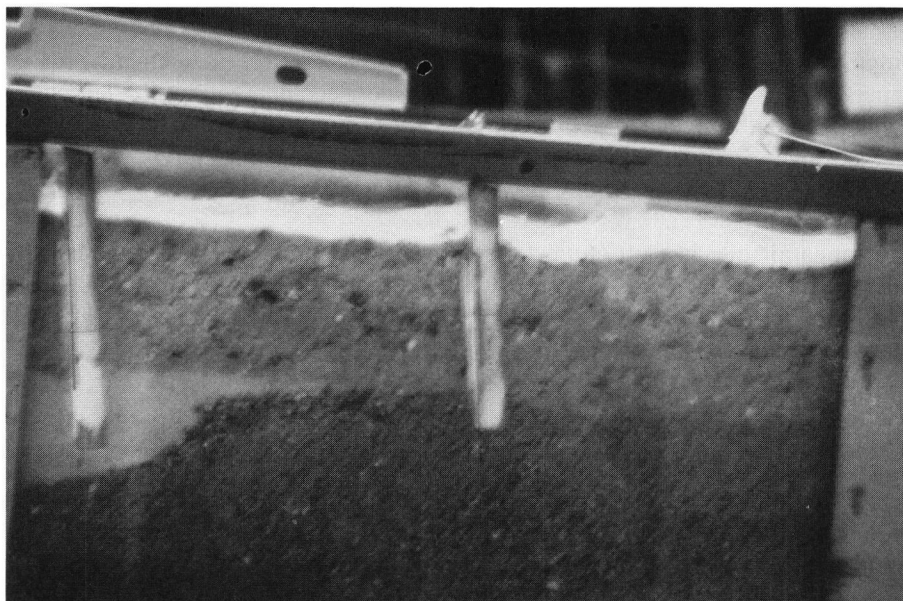


Figure 4-42 : Photo du lit durant la première phase d'un essai.

Ainsi, les formes du fond sont peu développées et l'on observe seulement deux phénomènes :

- **Le déplacement, vers l'amont, d'antidunes** d'une épaisseur de quelques cm. La progression de ces structures est lente - d'environ 1 cm/mn- et irrégulière. Cette irrégularité semble partiellement liée à la granulométrie du lit. En effet, des amas de blocs sont dispersés sur le lit et offrent un obstacle temporaire à la propagation²⁰. Cependant, tant que l'érosion est intense, aucune structure ne peut résister durablement à l'érosion régressive, la hauteur d'une antidune étant largement supérieure au diamètre des plus gros grains. L'apparition des ces antidunes n'est jamais systématique.
- **La propagation de structures présentant un fort contraste granulométrique.** Il s'agit de phénomènes nettement plus difficiles à observer. Il semble en effet que le lit, même de largeur réduite, n'est pas de granulométrie uniforme mais qu'il se crée des zones de pente relativement faible et de granulométrie fine sur lesquelles

²⁰ Il est difficile de connaître la cause profonde des arrêts de la propagation des antidunes. Il semble que les phénomènes d'arrachement des grains ne sont pas prépondérants mais qu'il s'agit plutôt d'une dynamique d'ensemble de l'antidune directement en rapport avec les conditions d'écoulement. En effet certains amas de blocs sont disloqués apparemment sans difficulté ni ralentissement de l'antidune, alors que d'autres, quelques fois plus réduits, résistent de longues minutes.

l'écoulement est très rapide²¹. D'autres zones, au contraire, concentrent temporairement des blocs grossiers et la pente y est très localement plus forte. Cependant, le caractère monodimensionnel de l'écoulement limite largement le développement de telles structures et elles restent toujours au stade embryonnaire. On retrouve cependant certaines caractéristiques des structures observées par MIZUYAMA (1977) et qualifiées de "dunes à forte pente²²".

Ainsi, il apparaît que la restriction de la largeur disponible pour l'écoulement limite considérablement le développement de structures morphologiques. Il est donc probable que le caractère particulier de l'écoulement monodimensionnel influence les caractéristiques du transport solide.

4.7.4. Processus physiques

Il est possible, à partir de ces résultats, de mieux comprendre les phénomènes physiques liés au charriage hyperconcentré et d'aboutir aux conclusions suivantes :

- **Le débit solide** est bien expliqué en considérant uniquement la pente et le débit liquide total. Il apparaît donc qu'il est limité uniquement par l'énergie fournie par l'écoulement.
- **Le tri granulométrique** se produit d'une façon opposée à celui que l'on observe pour les contraintes de cisaillement plus réduites. Ainsi, en particulier au moment de l'établissement de l'écoulement, les éléments grossiers sont plus facilement transportés alors que les éléments fins restent dans le lit. MIZUYAMA (1977) avait déjà fait cette constatation lors de ses essais. Cependant, une analyse plus fine montre que les éléments très grossiers ont une mobilité plus réduite et qu'elle présente une grande dispersion.

Il semble alors possible de proposer le schéma suivant :

lorsque la contrainte de cisaillement est élevée, une grande quantité d'éléments est mise en mouvement. Il y a alors formation d'une couche de transport composée d'un mélange d'eau et des matériaux transportés. Les grains roulant sur le lit ou sur d'autres grains, ils sont d'autant plus hauts que leur diamètre est important.

La contrainte de cisaillement²² exercée par le fluide est donc d'autant plus importante que le grain est gros. En effet, chaque grain transporté consomme de l'énergie et réduit la vitesse du fluide à son niveau. Ainsi, son exposition à l'écoulement augmente nettement avec son diamètre et sa mobilité suit - plus lentement - cette évolution. Cette différence est encore plus importante que dans le cas d'un grain exposé seul à l'écoulement car la couche de transport est une zone fortement cisailée, et le gradient de vitesse y est très important.

On comprend alors le tri granulométrique qui se produit dans ce type d'écoulement :

²¹ Cette remarque ne remet pas en cause l'hypothèse d'un comportement uniforme pour l'ensemble du canal. En effet, ces phénomènes ne couvrent généralement pas une zone significative du canal et ont une durée du même ordre que les intervalles de prélèvement. Ainsi, le protocole utilisé permet d'en faire une mesure moyenne. D'autre part, l'effet de ces fluctuations est nettement reproduit par les mesures de vitesse comme le montre la figure 4-6.

²² Ici, on désigne par ce terme l'ensemble des actions de l'écoulement sur les grains.

- les éléments fins, au niveau du lit fixe, sont très peu sollicités par l'écoulement. Ainsi, bien qu'ils soient faciles à transporter, leur mobilité est faible. Ils restent à proximité du lit et forment une surface relativement lisse facilitant ainsi le transport d'éléments plus gros.
- Les sollicitations augmentent avec la taille des éléments. Les blocs sont alors plus facilement transportés. D'autre part, le lit, devenu plus fin, n'offre aucun obstacle permettant aux éléments grossiers de se caler. Ils sont alors condamnés à être transportés sauf si, à la faveur d'une modification locale de la morphologie, une augmentation de la granulométrie du lit leur permet de se loger entre deux blocs de taille comparable²³.
- Cette augmentation de la mobilité avec la taille des grains a cependant une limite : lorsque le diamètre devient supérieur à la hauteur de mélange, la contrainte de cisaillement n'augmente plus. l'indice de mobilité relative diminue alors rapidement avec la taille des grains comme c'est le cas de la classe 10 - 15 mm.

Cette explication est renforcée par une analyse plus fine des débits solides. En effet, il apparaît qu'une diminution du débit solide des éléments grossiers correspond à une augmentation de celui des éléments fins.

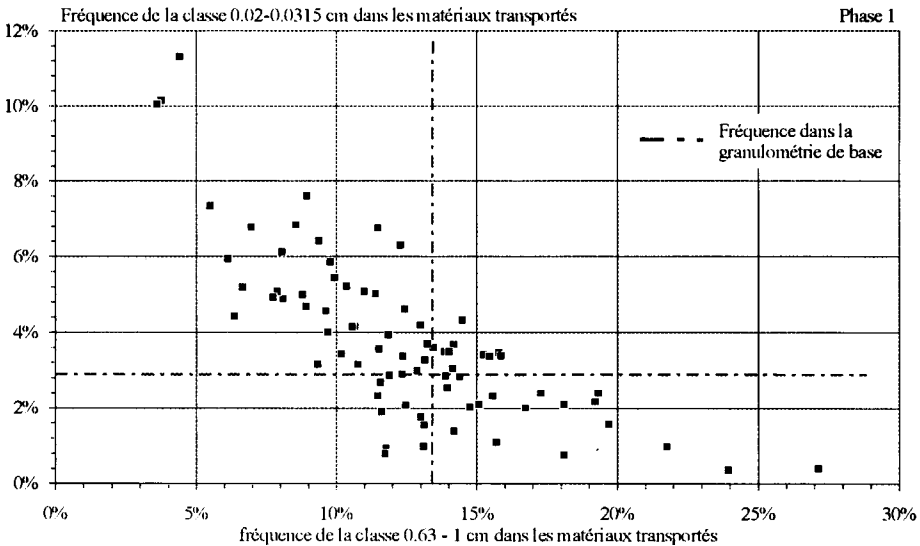


Figure 4-43 : Comparaison des fréquences des classes 0.02 - .0315 cm et 0.63 - 1 cm durant la première phase.

Le phénomène de compensation est dans ce cas beaucoup plus important que l'effet mécanique de calcul des fréquences qui entraîne que lorsque l'une augmente, les autres diminuent, la somme étant égale à 100%. La comparaison avec la figure 4-50 montre qu'il ne s'agit pas seulement d'une compensation mathématique.

²³ Le caractère instable du charriage hyperconcentré apparaît nettement ici : les éléments grossiers ne peuvent s'arrêter que si d'autres grains de même taille l'ont déjà fait.

Il apparaît donc que les éléments fins ne peuvent se déplacer que lorsque les éléments grossiers sont moins présents dans la couche de transport, laissant alors à l'écoulement la possibilité de solliciter les éléments fins près du lit. Cette constatation renforce l'hypothèse précédente.

4.8. Deuxième phase : transition vers le pavage

4.8.1. du débit solide

Il s'agit d'une phase de transition importante, en particulier en ce qui concerne le débit solide car celui-ci passe de 1000 à 10 g/mn en quelques minutes. C'est durant cette phase que le transport solide n'est plus seulement expliqué par le débit liquide mais aussi par la configuration du lit. Ainsi, les formules sommaires de débit solide, où seule la pente et le débit interviennent, ne sont plus valables. La figure ci-dessous correspond à l'application de la formule de SOGREAH.

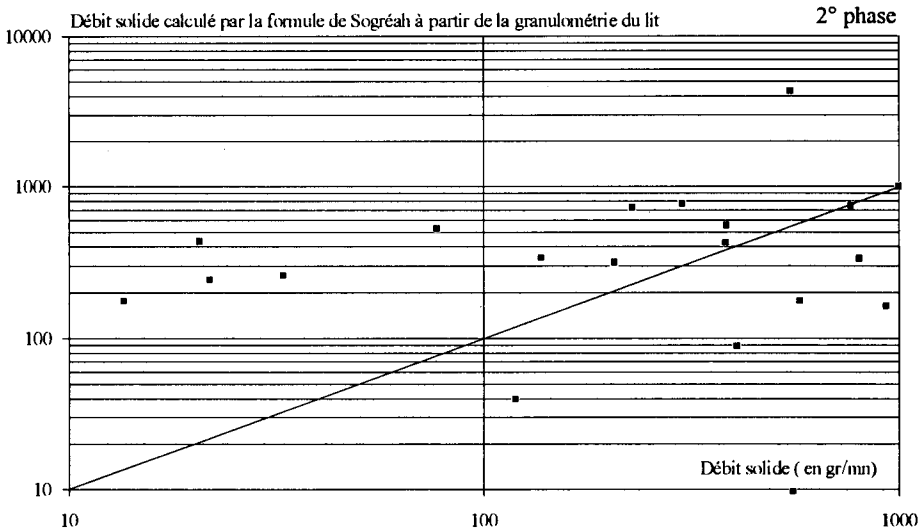


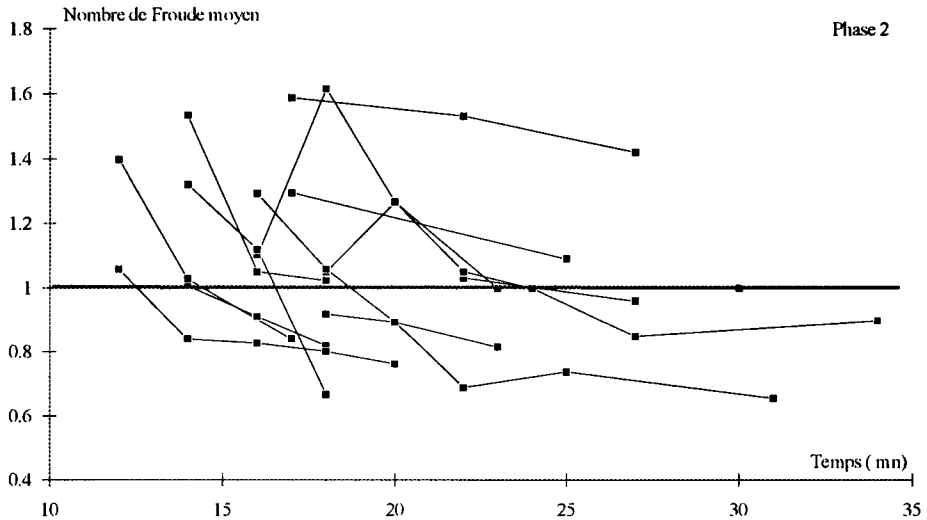
Figure 4-44 : Confrontation du débit solide mesuré et du débit solide calculé par la formule de Sogreah

L'apparition d'un nouveau phénomène apparaît clairement sur ce graphique. En effet, le débit solide calculé varie peu (dans un rapport de 1 à 5 environ) montrant ainsi la relative constance des conditions hydrauliques. Au contraire, le débit solide mesuré chute.

On a vu précédemment qu'aucune formule classique ne permettait de suivre de façon plus satisfaisante cette évolution. Il s'agit donc ici de comprendre le phénomène plutôt que d'établir une nouvelle formule. On va étudier les conditions hydrauliques puis le tri granulométrique.

4.8.2. Conditions hydrauliques

L'évolution des conditions hydrauliques témoigne d'un "retour à la normale" pour l'écoulement. En effet, comme le montre la figure suivante, le nombre de Froude²⁴, élevé pendant la première phase, se retrouve à des valeurs un peu inférieures à l'unité. De plus, la dispersion diminue comme le montre la figure suivante :



Cette évolution correspond à une très nette augmentation de la hauteur d'eau suite au ralentissement de l'écoulement engendré par une augmentation de la rugosité du lit. Si l'on considère la hauteur d'eau, on observe aussi la même diminution des fluctuations. Ainsi, la réduction du transport solide permet un retour aux lois de l'hydraulique. La figure suivante compare la hauteur d'eau mesurée à la hauteur de mélange calculée par la méthode de SMART & JAEGGI.

²⁴ Le nombre de Froude est ici calculé en considérant la hauteur du mélange eau + sédiment. Dans le pire des cas, l'écart en considérant la hauteur d'eau serait de 9 % sur le nombre de Froude. C'est une valeur très faible par rapport à la dispersion de ce paramètre.

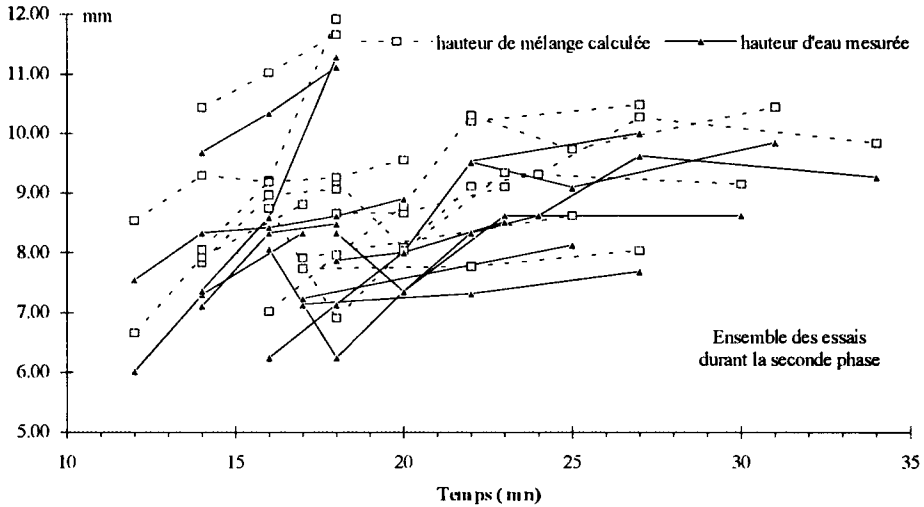


Figure 4-46 : Evolution de la hauteur d'eau et de la hauteur de mélange.

Cette figure montre que les formules perdent de leur validité car il semble que le phénomène physique ait évolué. En effet, à la fin de cette phase, le transport solide devient négligeable et il n'y a plus d'écart entre hauteur de mélange et hauteur d'eau²⁵. Cette différence s'explique par les conditions expérimentales qui ont conduit à la formule de calcul de la hauteur de mélange par SMART & JAEGGI (1983). Ils ont toujours considéré un transport solide équilibré - c'est à dire contrôlé uniquement par les conditions hydrauliques - donc beaucoup plus important.

Cet exemple montre qu'une fois que la structuration du lit intervient dans la fourniture de matériaux, les connaissances acquises en charriage hyperconcentré perdent leur validité et l'on se retrouve en pleine zone d'incertitude. On se retrouve alors dans les conditions de charriage ordinaire²⁶ qui correspond au phénomène le plus fréquent dans la nature mais qui reste mal connu à cause de l'action prépondérante du lit sur le transport solide.

La figure suivante correspond à la contrainte de cisaillement adimensionnée par le d_{50} du matériau de base et par le d_{90} du matériau du lit.

²⁵ En effet, le calcul montre qu'un débit solide de 10 g/mm, même avec un débit liquide de seulement 0.2 l/s, correspond à une concentration (q_s/q) de seulement 0.3 ‰. Il est alors difficile de croire que ce faible transport est à l'origine d'une augmentation de la hauteur d'eau supérieure à 5%. L'observation de l'écoulement lors des essais confirme que le transport solide avait une influence tout à fait négligeable sur les conditions hydrauliques à la fin de la seconde phase.

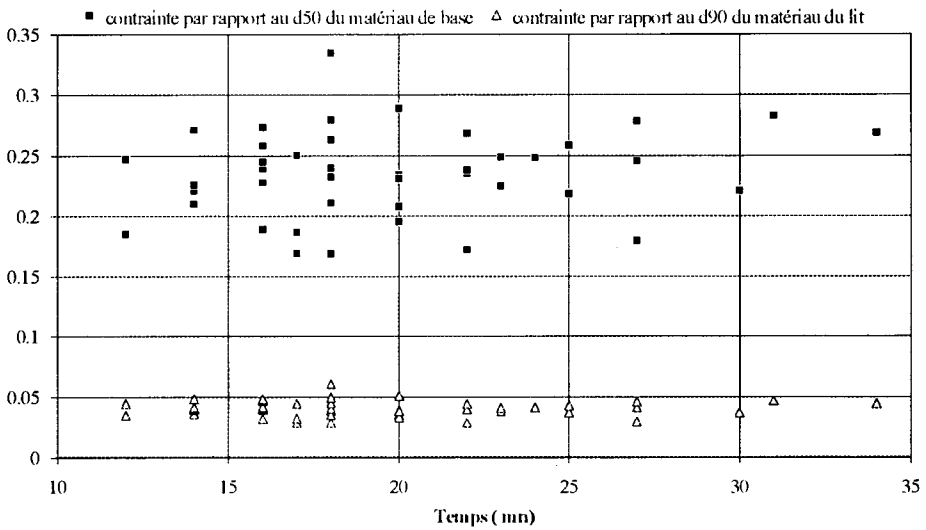


Figure 4-47 : Contrainte de cisaillement adimensionnelle durant la seconde phase.

Ce calcul montre qu'un tri est possible car la contrainte de cisaillement est supérieure au seuil de début de mouvement lorsque l'on considère le d_{50} de la granulométrie de base alors que l'on se trouve à la limite de début de transport dans le cas du d_{90} du lit. Ainsi, si l'on considère les classes indépendamment et sans coefficient de masquage, un calcul brutal conduirait à une érosion de tous les grains qui ont un diamètre inférieur au d_{50} ²⁶ alors que les autres n'auraient aucun mouvement. Or les mesures ont montré un comportement nettement plus contrasté.

4.8.3. Evolution granulométrique

4.8.3.1. Granulométrie transportée

La première étape consiste à comparer la granulométrie transportée avec la granulométrie de base du matériau. En effet, il s'agit d'un bon indicateur du tri granulométrique.

La figure suivante montre que la granulométrie transportée durant la deuxième phase est nettement plus fine que la granulométrie de base.

²⁶ Il ne s'agit là que d'un ordre de grandeur. On peut prendre aussi comme référence le diamètre moyen de la granulométrie de base.

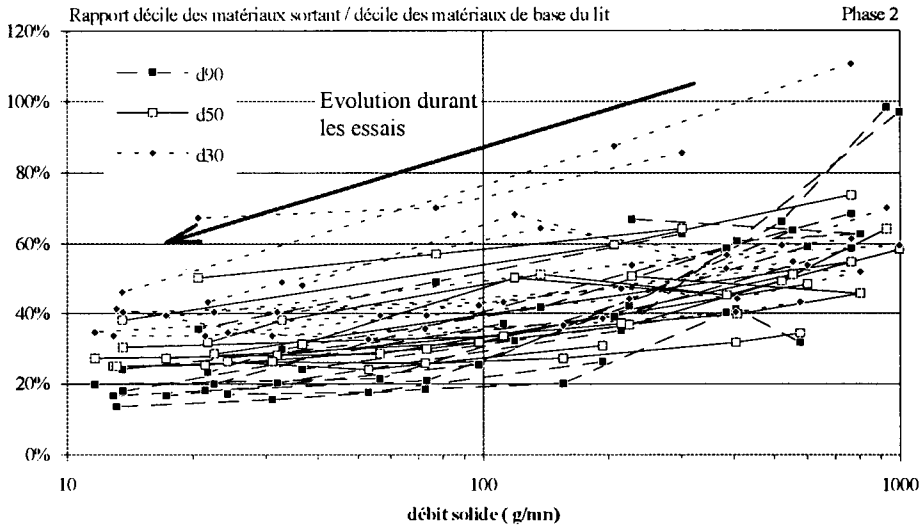


Figure 4-48 : comparaison de la granulométrie transportée avec la granulométrie de base durant la deuxième phase.

Le rapport est d'autant plus faible que le décile correspond à des éléments grossiers. Il y a donc un tri mais aussi un resserrement de la granulométrie sortante. Enfin, on observe, à l'image des conditions hydrauliques, une diminution de la dispersion. Cette tendance très marquée du tri granulométrique correspond à une forte diminution du transport solide durant cette phase.

La diminution de la taille des grains transportés est évidemment une caractéristique importante puisque le diamètre des grains est réduit de moitié durant cette phase. La figure suivante montre l'évolution de la courbe granulométrique durant l'essai 6.

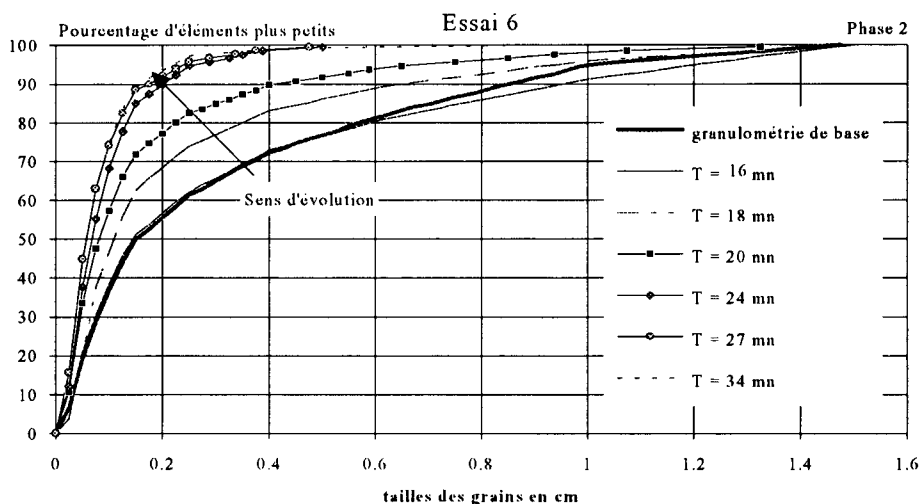


Figure 4-49 : Evolution de la granulométrie transportée durant la phase 2 de l'essai 6.

Là encore, la diminution du débit solide des éléments grossiers correspond à une augmentation des éléments fins comme on l'avait déjà remarqué durant la phase 1. Cependant, la tendance est nettement moins marquée, et il apparaît donc que d'autres phénomènes contribuent au tri granulométrique²⁷.

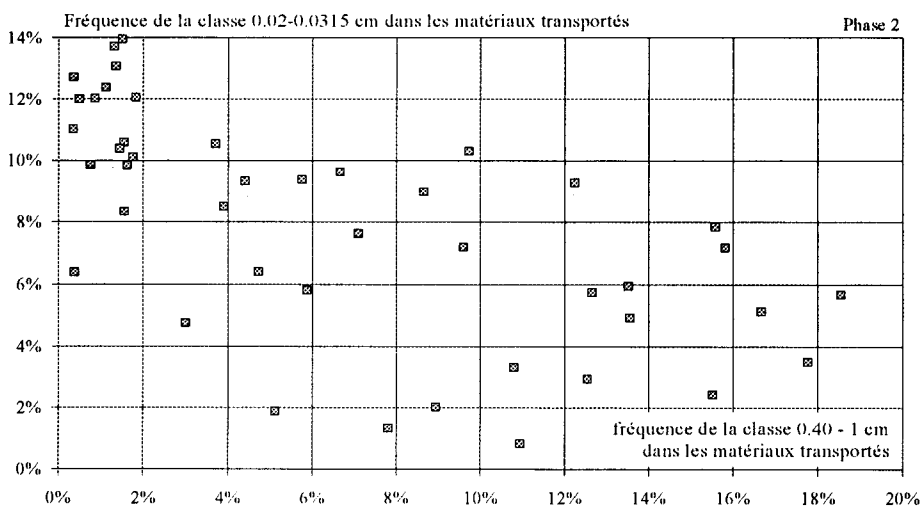


Figure 4-50 : Comparaison des fréquences des classes 0.02 - .0315 cm et 0.40 - 1 cm durant la deuxième phase.

²⁷ On peut alors en conclure que le comportement vis à vis du lit prend le pas sur les interactions dans la couche de mélange.

La figure précédente montre en effet - lorsqu'on la compare à la figure 4-43 que le lien est beaucoup plus lâche entre les débits solides des classes grossières et les débits des éléments fins. L'étude de l'évolution de la granulométrie du lit semble nécessaire pour mieux comprendre les mécanismes de l'évolution du transport solide.

4.8.3.2. Granulométrie du lit

La diminution de la granulométrie transportée correspond évidemment à une augmentation de la granulométrie du lit. La figure suivante montre son évolution durant l'essai 9. Mais plus qu'une évolution de la taille des grains, on notera un changement de la forme de la courbe granulométrique.

Ainsi, la prise de contrôle du transport solide par le lit se traduit d'abord par une diminution du nombre d'éléments fins, puis par une augmentation rapide de la fraction d'éléments moyens, la part des blocs de plus de 1 cm passant de 20 à 30% durant cette phase.

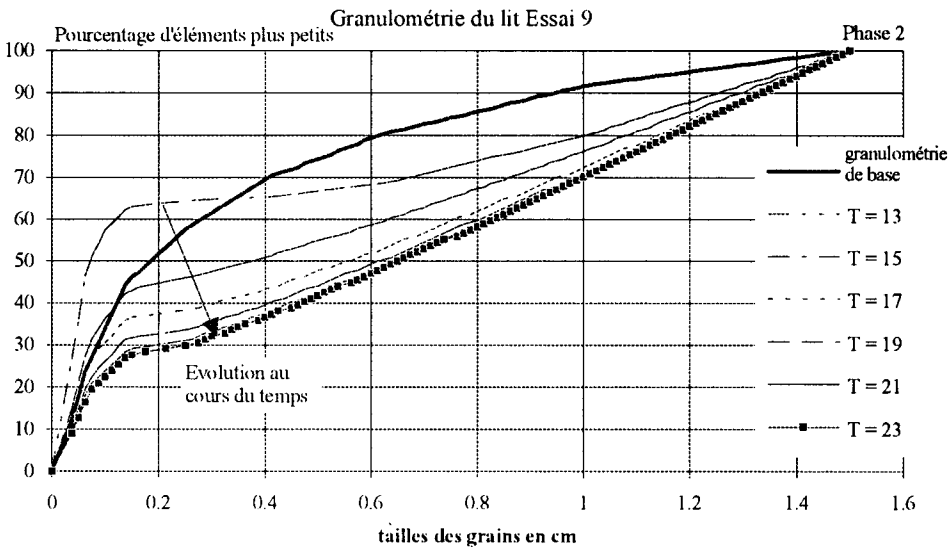


Figure 4-51 : Evolution de la granulométrie du lit durant la phase 2 de l'essai 9.

4.8.4. Probabilité de mouvement des grains - bi-stabilité de la granulométrie du charriage hyperconcentré

L'évolution de l'indice de mobilité relative montre clairement l'évolution du tri granulométrique durant cette phase. La figure suivante montre une inversion très nette de la mobilité des grains. Il y a alors un changement de la nature des phénomènes intervenant dans le transport solide.

En effet, les éléments grossiers, plus facilement transportés dans la première phase, voient leur mobilité divisée par 10 en quelques minutes. Au contraire, les éléments fins et moyens se trouvent beaucoup plus nombreux dans l'écoulement.

Ainsi, à un transport intense sur un lit fin, gouverné par la distribution des contraintes de cisaillement, succède un transport où l'arrachement du grain du lit est prépondérant.

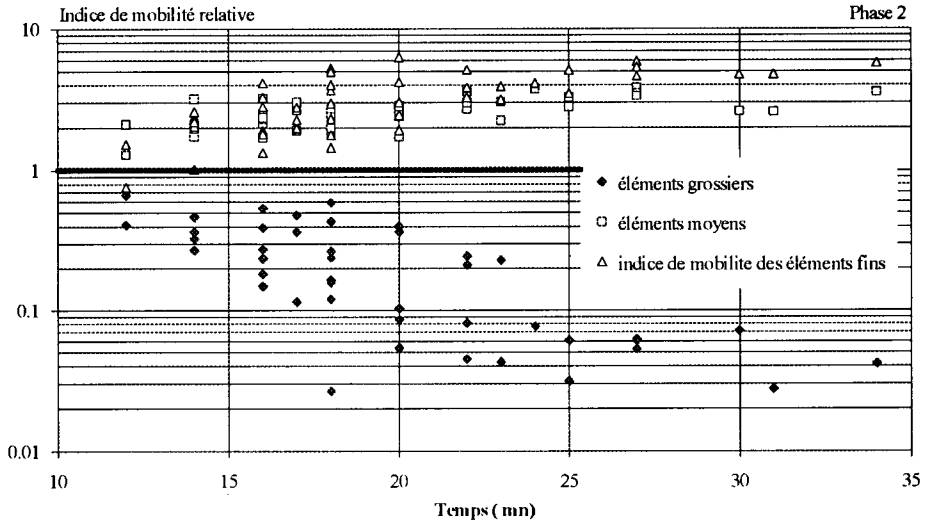


Figure 4-52 : Evolution de l'indice de mobilité relative en fonction du temps pour l'ensemble des essais.

D'autre part, l'indice de mobilité relative permet de mieux comprendre le caractère bi-stable des processus. En effet, il apparaît, comme le montre la figure suivante que la mobilité d'une classe granulométrique est d'autant plus grande que cette classe est peu représentée dans le lit.

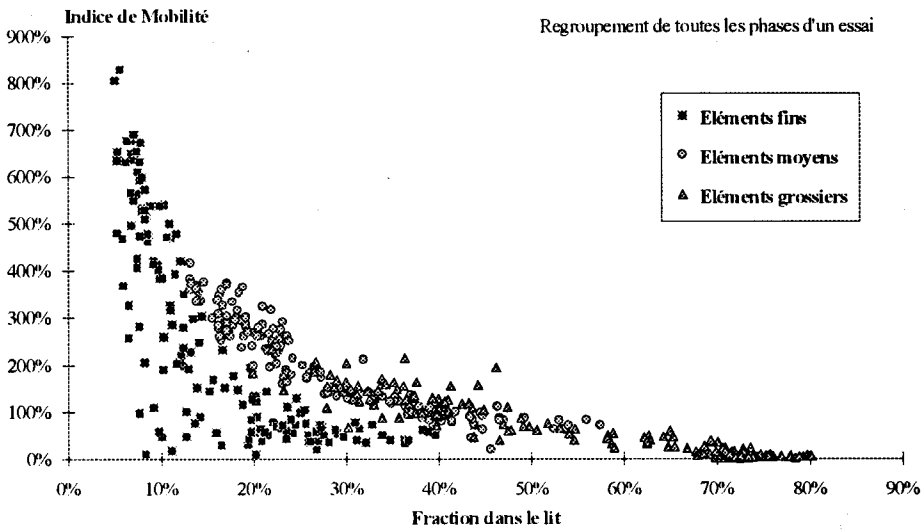


Figure 4-53 : Mobilité de chaque classe granulométrique en fonction de sa fraction dans le lit pour l'ensemble des essais.

Evidemment, cette caractéristique entraîne une forte instabilité du phénomène.

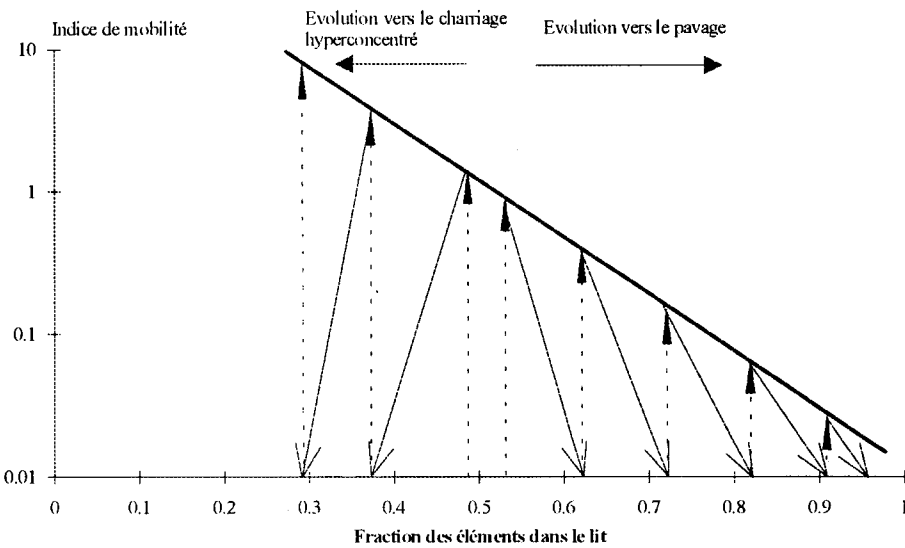


Figure 4-54 : Schéma d'évolution de la granulométrie du lit à partir de l'indice de mobilité relative.

Ce schéma est le suivant (en considérant par exemple les éléments grossiers) :

1. Si l'on part d'une forte représentativité d'éléments grossiers²⁸, celle des éléments moyens et fins est faible. L'arrachement des grains dans le lit est alors plus important pour les éléments fins et moyens que pour les éléments grossiers.
2. On obtient, à l'étape suivante, une fraction encore plus grande d'éléments grossiers et encore plus faible d'éléments moyens et fins.
3. L'écart de mobilité se creuse encore et le phénomène s'emballe. Cependant, il correspond à une diminution du débit solide et le lit devient pavé et stable.

De même, en partant d'une fraction grossière faible, la mobilité des éléments grossiers est forte et l'on obtient par la suite un lit encore plus fin. On se trouve alors dans le cas du charriage hyperconcentré qui présente - localement - un équilibre stable car limité par les conditions hydrauliques. Cet équilibre correspond à un transport solide exacerbé.

Or, toutes les classes connaissant la même tendance (augmentation de la mobilité avec la diminution de la fraction dans le lit), aucun élément régulateur n'apparaît dans les caractéristiques du tri granulométrique.

Un modèle numérique simplifié confirme ce comportement. Il est exposé à l'annexe IV.

Cependant, les conditions extérieures (pente, apports amonts, débit liquide) régulent les phénomènes et l'instabilité ne se produit que dans une plage réduite, lorsque l'arrêt durable des éléments grossiers est possible.

Dans ce cas, il semble que le caractère aléatoire du transport solide et de l'interaction des grains entre eux permet une certaine réversibilité en bouleversant (localement) le système lit + écoulement. Ce retour en arrière est d'autant plus facile que le processus est peu engagé.

4.8.5. Morphologie - Signification physique

Malgré une évolution très marquée des paramètres du transport solide en quelques minutes, l'observation du canal ne permet pas de remarquer une rupture de comportement de l'écoulement et de sa morphologie.

Il apparaît cependant une nette diminution de la vitesse de l'écoulement et des éléments transportés. Ainsi, la concentration en matériaux transportés, pour chaque section, varie dans de moins grandes proportions que le débit solide. Ce phénomène explique que l'évolution du transport solide soit plus difficile à percevoir lors de l'observation du canal.

La disparition des antidunes est une caractéristique de cette phase de transition. Elle semble directement liée à l'arrêt de plus en plus fréquent des amas de blocs. En effet, durant la première phase, les plus gros éléments se déplaçaient par paquets -

²⁸ La forte représentativité est définie par rapport à la valeur pour laquelle il n'y a pas de tri granulométrique, c'est à dire à la fraction de la granulométrie de base (dans ce cas, tous les indices de mobilité sont égaux à l'unité). Il ne semble pas qu'il y ait de valeur charnière absolue mais seulement une évolution par rapport au matériau de base.

probablement à cause des variations locales de rugosité - mais leur arrêt sur le lit était exceptionnel et toujours de courte durée.

Au contraire, durant cette phase, les blocs ont beaucoup plus de facilité pour s'arrêter lorsqu'ils sont en paquet. Il y a alors imbrication des éléments entre eux et la structure est résistante malgré l'augmentation locale des conditions hydrauliques. Cette rupture dans l'écoulement, associée à une possibilité de remous solide, facilite l'arrêt des matériaux en amont de cette structure formant alors un lit plus résistant.

Cependant, il se produit un affouillement en aval de l'amas de blocs qui est d'autant plus rapide que la granulométrie de l'ensemble du lit est fine. La structure, sapée au niveau des éléments de base, est alors détruite. On observe une bouffée de transport solide, avec la formation d'un bourrelet frontal²⁹ qui facilite la destruction des structures en aval.

La morphologie du lit est donc essentiellement dominée par une alternance d'amas de blocs et de zones de granulométrie plus fine mais non structurées. Cette couche de surface, en butée sur les amas de blocs, est mise en mouvement brutalement à chaque rupture d'un amas. Le glissement des grains est alors suffisamment lent et progressif pour leur permettre de s'imbriquer les uns dans les autres et de présenter la plus forte résistance possible à l'arrachement. Il apparaît que les zones structurantes du lit sont formées durant cette phase de l'essai.

Peu à peu, derrière chaque amas, une zone de granulométrie assez grossière de plus en plus grande se forme jusqu'à rejoindre l'aval de l'amas de bloc supérieur. L'affouillement est alors beaucoup plus difficile et finit par être insuffisant pour détruire la structure. La couche de surface est alors figée : le transport solide est largement diminué et l'érosion "globale" est arrêtée : il ne se produit plus que l'arrachement d'éléments incomplètement intégrés dans la couche superficielle du lit. On se trouve alors dans la troisième phase des essais.

Ainsi, la formation du lit et le contrôle du transport solide apparaissent comme un phénomène à la fois local (arrêt d'un amas de bloc) et global (augmentation de la granulométrie de l'ensemble du lit permettant de limiter l'affouillement des amas). Il apparaît d'autre part qu'il n'est pas possible de considérer indépendamment un grain mais que son comportement est dicté par son environnement et les possibilités d'entraide dont il dispose - même lorsqu'il compte parmi les éléments les plus gros.

²⁹ Cette terminologie est usuellement réservée aux laves torrentielles. Il y a cependant, dans ce cas, beaucoup de caractéristiques communes. En effet, si la concentration en matériaux est nettement plus faible que pour les laves, il apparaît derrière les plus gros blocs, un très fort transport solide et une augmentation de la hauteur d'eau.

Cependant, cette bouffée reste nettement biphasique - dans le cas des modèles réduits - et s'amenuise assez rapidement au contraire des laves torrentielles.

4.9. Troisième phase : lessivage du lit

4.9.1. Evolution du débit solide

Dans la troisième phase des essais, le débit solide est inférieur à 10 g/mn ce qui correspond à une concentration maximale de 0.5 g/l. La figure suivante montre l'évolution du débit solide durant cette phase.

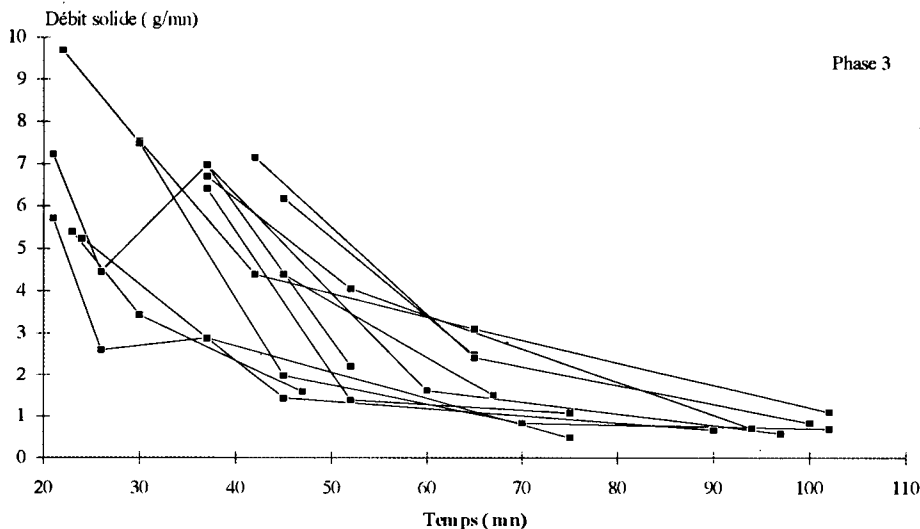


Figure 4-55 : Evolution du débit solide durant la troisième phase.

Il apparaît que le débit solide diminue très régulièrement durant cette période. Il y a "seulement" une division par 10 du débit solide durant une très longue période. Cette phase correspond plus à l'épuisement d'un stock de matériaux qu'à la diminution de la vigueur des conditions hydrauliques (phase 1) ou à l'apparition d'un autre phénomène (phase 2).

La figure suivante montre la contrainte de cisaillement adimensionnée par la granulométrie du lit. Cette contrainte est très peu variable durant un essai mais aussi d'un essai à l'autre. D'autre part, les éléments correspondant au d_{90} sont très difficiles à déplacer (contrainte de cisaillement environ 10 fois trop faible) alors que ceux d'un diamètre égal au d_{50} sont proches du seuil de transport.

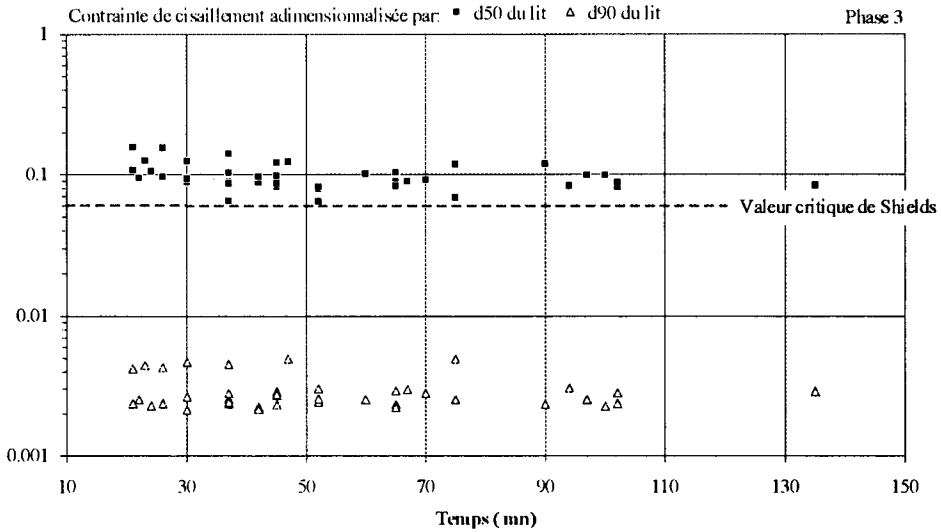


Figure 4-56 : Contrainte de cisaillement adimensionnelle durant la troisième phase.

DUVERT (1993) a cherché à expliquer les évolutions du débit solide. Il s'agit de la phase la plus longue des essais, pendant laquelle le lit n'évolue pratiquement pas.

Les tentatives de corrélation du débit solide en fonction des paramètres hydrauliques ou granulométriques ont toutes abouti au même échec : dans cette étape, seul le débit solide varie, tous les autres paramètres étant globalement invariants.

La seconde tentative est de considérer l'évolution au cours du temps du débit solide et d'en tirer des conclusions sur les processus physiques se déroulant alors. Il est vite apparu que la longueur du canal était, de loin, le paramètre principal. Il a donc été nécessaire de distinguer les essais dans des canaux de différentes longueurs.

Un autre paramètre est le débit liquide : plus celui-ci est important, plus la décroissance du débit solide est lente. Cependant, cette tendance est moins nette, et l'explication du débit solide en fonction du temps et de la longueur du canal aboutit à :

$$q_{s\ 1\text{m}} = \frac{1}{-.322+0.02\ \text{temps}} \quad (\text{canal de 1 m de long}) \dots\dots\dots (4-25)$$

$$q_{s\ 2\text{m}} = \frac{1}{-.427+0.016\ \text{temps}} \quad (\text{canal de 2 m de long}) \dots\dots\dots (4-26)$$

$$q_{s\ \text{ensemble}} = \frac{1}{-.34+0.075\ \text{temps}} \quad (\text{ensemble des valeurs}) \dots\dots\dots (4-27)$$

Ces relations expliquent environ 80 % de la variance. Des tentatives ont été conduites en effectuant des hypothèses sur la propagation "d'ondes de pavage". Cependant, en particulier à cause de la faible longueur du canal, il n'a pas été possible de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans le canal.

4.9.2. Granulométrie

La taille des éléments transportés est très réduite par rapport au transport solide au début de l'essai ou même à la granulométrie de base. Ainsi, la figure suivante permet de comparer la granulométrie de base à celle transportée.

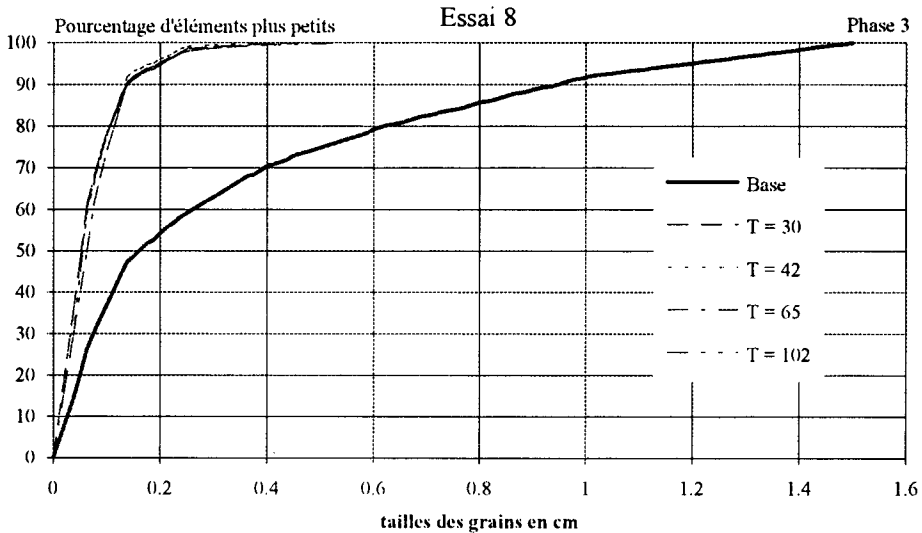


Figure 4-57 : Evolution de la granulométrie transportée durant l'essai 8.

La granulométrie transportée est nettement plus fine puisque le d_{90} est divisé par 7.2. D'autre part, la répartition des effectifs dans les classes granulométriques est très régulière. Enfin, on obtient les mêmes granulométries pour tous les essais.

Dans certains cas, une brusque augmentation du d_{90} correspond à l'arrachement d'un grain grossier mal positionné dans la phase précédente.

La granulométrie du lit montre des résultats très semblables d'un essai à l'autre. De plus, dès la fin de la deuxième phase, il n'y a plus d'évolution sensible de la composition du lit car les débits solides sont très faibles. La figure page suivante montre la granulométrie finale du lit obtenue au cours de différents essais.

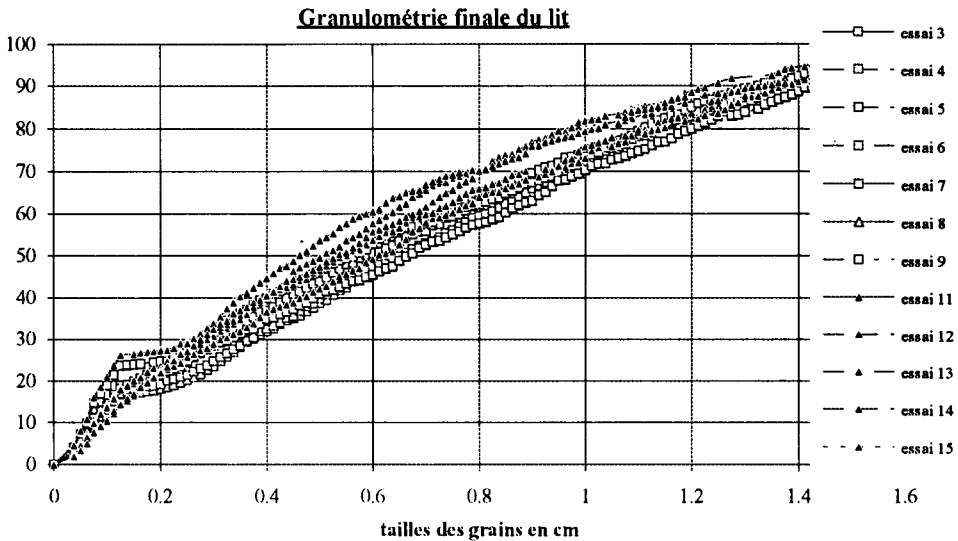


Figure 4-58 : Granulométrie finale du lit pour l'ensemble des essais

Malgré une dispersion relativement forte au centre de la courbe, il apparaît une différence faible mais significative entre les essais avec un canal de 1 m de long (à la granulométrie un peu plus faible) et ceux avec un canal de 2 m de long (essai 11 à 15). Il n'est pas facile d'expliquer la différence entre ces résultats. Il est possible qu'une différence dans la méthode de mesure de la granulométrie par photo (changement d'opérateur) suffise à expliquer cet écart.

La forme de la courbe granulométrique obtenue finalement (presque une droite) est remarquable car elle a été fréquemment rencontrée sur modèle réduit dans le cadre d'essais où l'on applique un écoulement d'eau peu chargé à une granulométrie étendue³⁰.

L'étude de l'indice de mobilité relative montre une grande stabilité. On retrouve les mêmes valeurs qu'en fin de seconde phase (figure 4-52) : les éléments sont d'autant plus difficiles à déplacer qu'ils sont gros. Il n'y a aucune évolution significative alors que le débit solide est divisé par dix. Cette absence de variation montre qu'il s'agit du même phénomène physique durant toute cette phase.

4.9.3. Etat final du lit pavé

Il est difficile de comparer directement les différents essais car la pente est d'autant plus faible que le débit liquide nominal est important. Il y a alors un mécanisme de compensation. La figure suivante permet de comparer les différents essais à partir d'une caractéristique plus locale : la contrainte de cisaillement.

³⁰ On verra que cette distribution se rencontre aussi sur le terrain (chapitre 7).

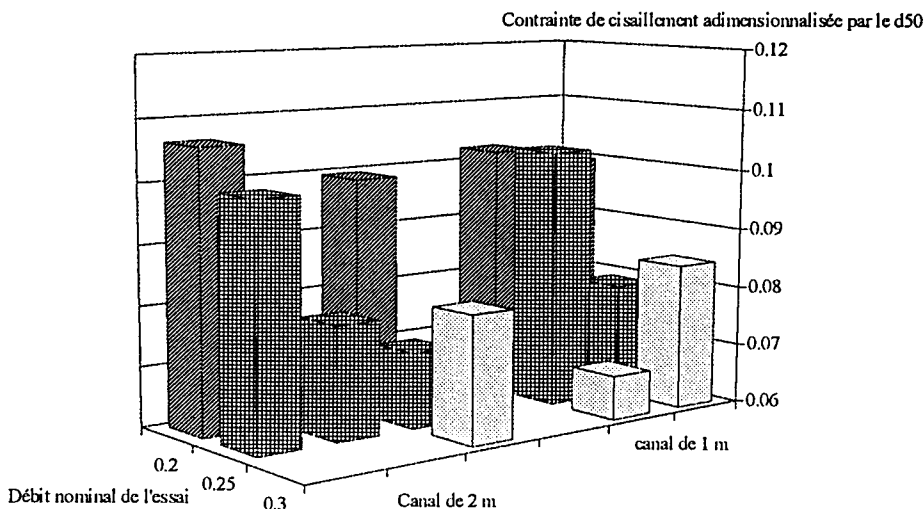


Figure 4-59 : Contraite de cisaillement adimensionnalisée par le d_{50} du lit en fin d'essai pour chacun des essais.

Il apparaît que la contraite de cisaillement correspondant au lit pavé est d'autant plus faible que le débit nominal est important. Ainsi, il semble que les différences de pente entre les essais sont supérieures à celle nécessaire pour équaler les contraintes de cisaillement : le lit pavé est d'autant plus résistant que le débit liquide nominal est faible.

Cet aspect a été relevé par de nombreux auteurs. Ainsi, SUZUKI & KATO (1989) ont obtenu, pour des pentes comprises entre 1 et 3 %, que la couche de surface est d'autant plus grossière que la contraite de cisaillement est proche de la valeur critique.

De même, ASHIDA, EGHIRA & ANDO (1984) considèrent qu'une contraite de cisaillement légèrement inférieure à la valeur critique pour les éléments les plus gros est nécessaire à la formation d'un pavage.

Cette plus grande résistance du lit à l'érosion pour les faibles débits formateurs peut s'expliquer de la façon suivante :

Dans le cas de conditions hydrauliques sévères, l'arrêt est déterminé par les fluctuations locales de l'écoulement plus que par l'orientation ou la disposition des blocs. Ils ne peuvent, comme lorsque la contraite de cisaillement est faible, bouger, rouler, et s'imbriquer pour former une structure très résistante.

Cependant, cette tendance est faiblement marquée et l'on peut, en première approximation considérer que le débit nominal est peu influent sur la résistance du lit pavé³¹.

³¹ Cette remarque n'est évidemment valable que dans la fourchette de débit (très réduite) de ces essais. En effet, si les débits varient de 50 %, les contraintes de cisaillement évoluent dans une moindre fourchette à cause du changement de pente. De plus, si la vitesse correspond à un écoulement critique, elle augmente un peu avec le débit, et la hauteur varie dans de moindres proportions.

Une autre démarche confronte le diamètre moyen mesuré dans le lit à la fin de l'essai et celui déterminé à partir de la formule de début de transport proposée par SOGREA. On obtient le diamètre moyen par :

$$d_m^{5/2} = \frac{Q_0 I^{13/6}}{0.0776(s-1)^{8/3} (1-1.2I)^{8/3} g^{1/2}} \dots\dots\dots (4-28)$$

La figure suivante montre, pour chaque essai, les deux valeurs du diamètre moyen :

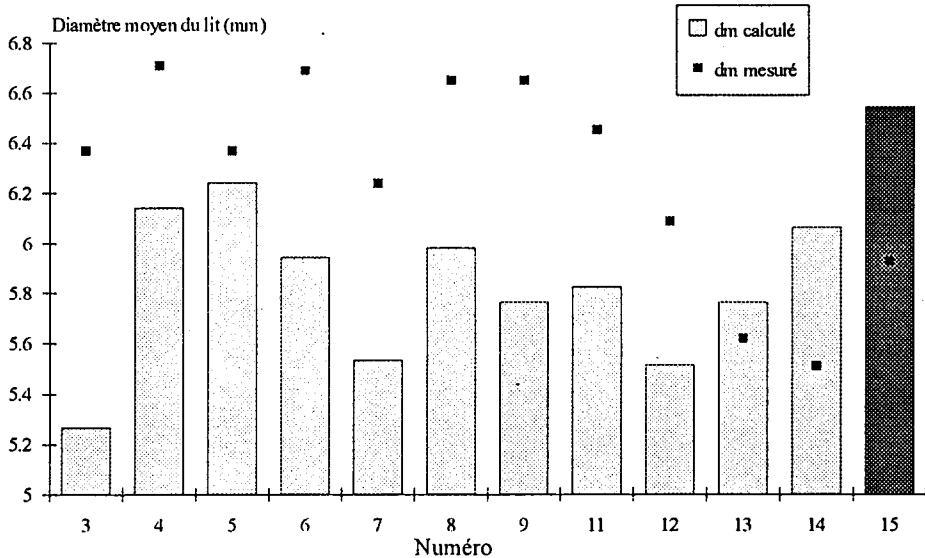


Figure 4-60 : diamètre moyen final mesuré et diamètre moyen calculé à partir des conditions hydrauliques pour chaque essai.

La première constatation concerne le fort regroupement des valeurs (l'étendue est d'environ 1 mm) pour les deux paramètres³². Il semble que le débit liquide ou la longueur du canal ne sont pas des paramètres explicatifs : tout se passe comme si la pente s'ajustait en fonction du débit pour parvenir au même résultat final.

D'autre part, les valeurs calculées par la formule de début de transport sont plus faibles - en moyenne - que celles mesurées. Cette constatation, surprenante à l'issue d'un essai de pavage, s'explique par le seuil très bas proposé par cette formule. On a vu, en effet, que la formule de SOGREA permet une prévision plutôt meilleure du débit solide pour les écoulements moyens à cause d'un seuil fixé plus bas et d'une faible progression du débit solide au-delà.

Cette explication est confirmée par les calculs de contrainte de cisaillement adimensionnelle réalisés au paragraphe 4.10.4 concernant le dépavage et qui montrent que le lit pavé est plutôt plus résistant à l'érosion qu'un lit non pavé de même granulométrie.

³² La valeur particulièrement élevée concernant le diamètre moyen calculé pour l'essai 15 s'explique par le mode opératoire particulier de cet essai : la pente avait été maintenue constante durant tout l'essai par abaissement du seuil aval.

4.9.4. Morphologie - processus physique

Il n'y a pas d'évolution morphologique marquée durant cette phase. Le lit est donc globalement celui qui est obtenu à la fin de la période de transition : les amas de blocs forment alors des seuils à espacement régulier alors qu'un lit avec une pente un peu réduite et une granulométrie légèrement plus fine sépare les seuils.

En aval des blocs importants, se trouvent des zones de granulométrie très fine. En effet, c'est dans le sillage des gros éléments que les fines transportées peuvent se déposer. Le transport d'éléments fins est le seul phénomène se déroulant lorsque le débit solide est réduit.

L'observation du lit montre que l'écoulement procède à un réarrangement de la surface en déplaçant les éléments fins. Il semble que les fluctuations turbulentes sont nécessaires pour arracher un élément fin masqué par un bloc et l'emporter à l'aval³³.

Pour ces éléments, la contrainte de cisaillement est nettement supérieure à la valeur critique de début de mouvement. Ainsi, on observe que certains grains, dans des zones de tourbillons tournent et sont déplacés dans le sillage d'un bloc. Si, au hasard d'une fluctuation ils passent dans l'écoulement, ils sont emportés directement par saltation plutôt que par charriage.

Ainsi, peu à peu, le volume disponible des grains fins dans les zones exposées aux fluctuations turbulentes diminue. Ainsi, le débit solide diminue progressivement sans que les caractéristiques globales du lit et de l'écoulement soient nettement modifiées.

Un autre phénomène s'ajoute au précédent : le dépôt de matériaux fins dans les zones protégées. En effet, les grains transportés par saltation ont la possibilité, durant le transport, d'arriver dans une zone de moindre contrainte de cisaillement. Ils peuvent alors s'y déposer.

Cependant, il ne s'agit que d'un phénomène très secondaire, d'une part à cause de la très faible contrainte de cisaillement critique des éléments fins, d'autre part parce que l'écoulement, naturellement, ne guide pas les éléments vers des zones abritées.

Cette dernière phase du pavage apparaît donc comme un ajustement du lit aux conditions d'écoulement. Cependant, l'absence de variation des conditions hydrauliques montre qu'il s'agit d'un phénomène mineur, incapable d'influencer les caractéristiques globales du modèle.

³³ En effet, tous les éléments fins directement exposés à l'écoulement ont déjà été emmenés, et seuls ceux qui sont dans le sillage des blocs sont encore présents à cet instant des essais. Au contraire du modèle proposé par ANDREWS & SMITH (1992), le phénomène commandant le départ d'un grain n'est pas l'angle de butée mais les fluctuations de vitesse à son niveau.

4.10. Quatrième phase : dépavage

Lors des essais de pavage, le débit liquide a été arrêté lorsque le débit solide devenait négligeable, c'est à dire lorsque l'évolution du lit ne concernait que quelques grains fins posés à sa surface.

Après arrêt du débit liquide, la granulométrie du lit a été mesurée par photographie, puis, une dernière phase, destinée à quantifier la résistance "hydraulique" du lit a été conduite. Elle est essentiellement destinée à comparer les solidités des pavages obtenus au cours de ces essais.

4.10.1. Evolution du débit solide

La figure suivante rappelle, pour l'essai 12, les conditions de la phase de dépavage. Cette phase est destinée à l'étude du départ des grains dans un lit pavé en fonction des conditions d'obtention du pavage.

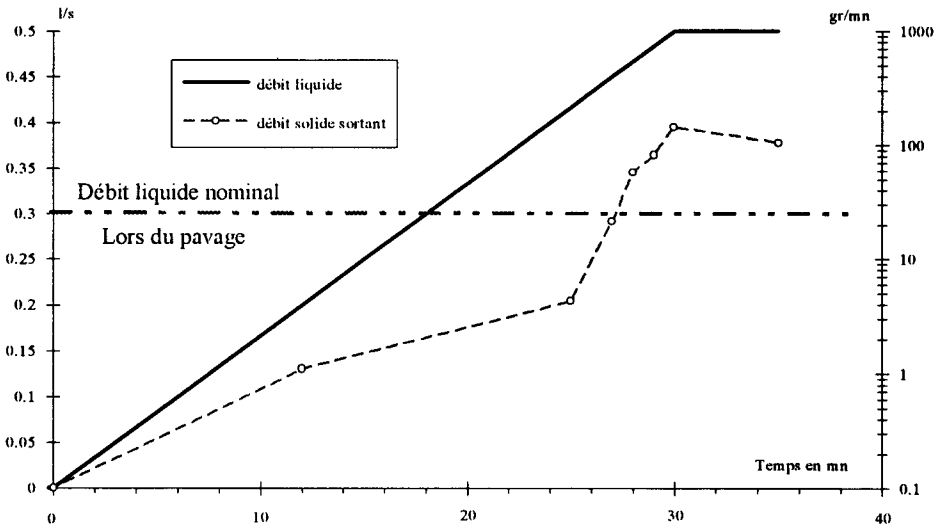
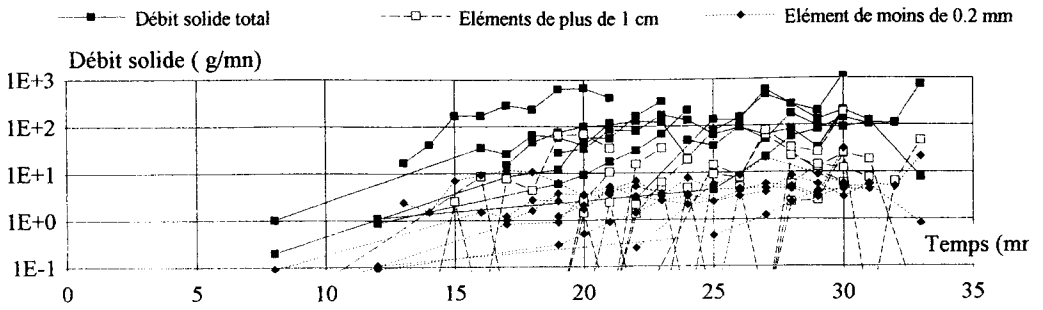


Figure 4-61 : Déroulement d'un essai de dépavage.

Dans une première étape, afin de comprendre la spécificité des phénomènes physiques, on a essayé d'expliquer l'évolution du débit solide en fonction d'autres paramètres. Cependant, la contrainte de cisaillement (même adimensionnée par un diamètre caractéristique) n'est pas un paramètre explicatif suffisant pour toute la durée d'un essai. Comme durant la première phase des essais, on trouve que la contrainte de cisaillement diminue lorsque le transport solide est très important³⁴.

³⁴ On avait expliqué cette particularité par une nette augmentation de la vitesse lorsque le lit se recouvre de matériaux fins. Cette explication reste valable ici. En effet, à la fin de ces essais, les conditions hydrauliques sont assez importantes pour que le lit soit dépavé et que l'on retrouve des conditions d'écoulement proches de celles de la première phase.

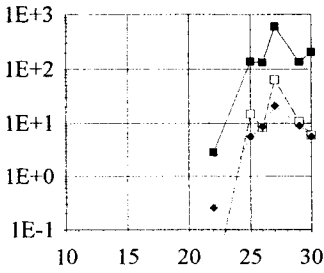
Ensemble des essais



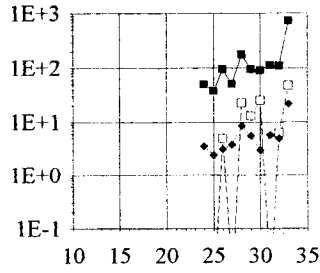
Essai 3

Essai 4

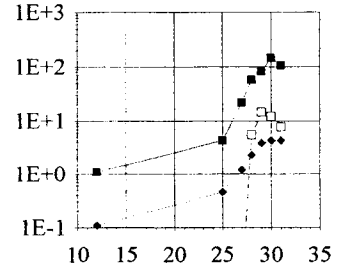
Essai 12



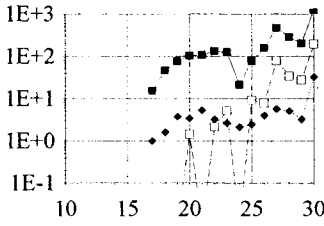
Essai 5



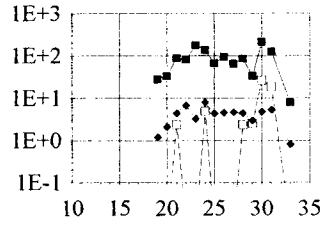
Essai 7



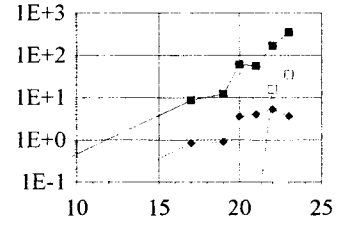
Essai 11



Essai 14



Essai 8



Essai 13

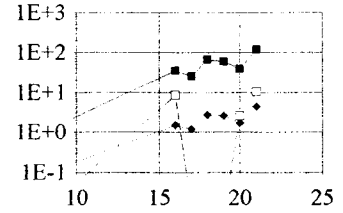
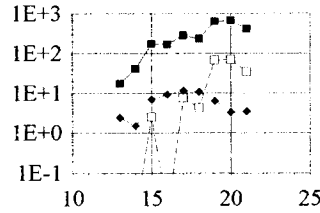
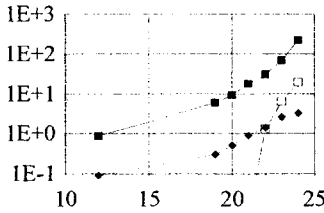


Figure 4-62 : Débit solide (ensemble des matériaux, classe granulométrique des éléments les plus grossiers et classe granulométrique des éléments les plus fins) pour chacun des essais en fonction du temps.

Il semble, là encore, que plusieurs phénomènes différentes se produisent durant le dépavage. Pour l'ensemble de cette phase la vitesse apparaît comme le meilleur paramètre explicatif du transport solide. La figure suivante montre le lien entre débit solide et vitesse de l'écoulement.

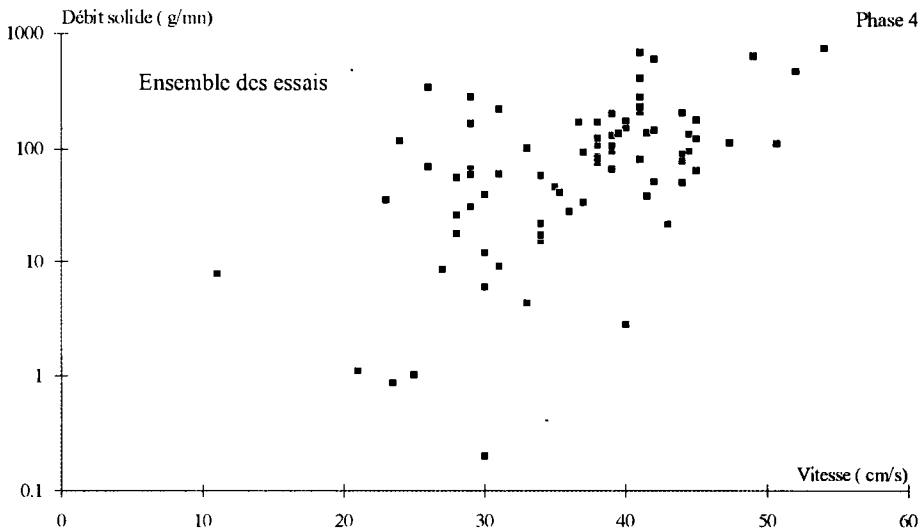


Figure 4-63 : Relation entre vitesse de l'écoulement et débit solide pour l'ensemble des essais.

Cependant, même s'il s'agit de la meilleure explication, elle n'est pas satisfaisante pour deux raisons :

- La dispersion reste considérable et l'on obtient des débits solides dans un rapport de 1 à 50 pour une même vitesse.
- Une telle explication revient, dans une certaine mesure, à expliquer le débit solide en fonction de lui-même. En effet, on a vu lors de la première phase que la vitesse ne pouvait être expliquée classiquement par la pente et la granulométrie du lit, mais qu'elle dépendait largement du transport solide. C'est encore vrai ici.

En fait, comme lors de la formation d'un lit pavé, il ne semble pas possible de quantifier le débit solide en fonction de paramètres décrivant l'état du lit.

Les courbes de la figure 4-64 montrent clairement que le comportement des éléments fins est très différent de celui des éléments grossiers. Le transport des premiers est beaucoup plus régulier et débute dès que le débit liquide est significatif³⁵.

³⁵ Quelques grains fins sont emportés avec un débit très faible (inférieur à 0.1 l/s). Cependant, il s'agit d'un phénomène très marginal, et le transport de fines ne commence réellement que lorsque le débit liquide est de l'ordre du débit nominal de l'essai.

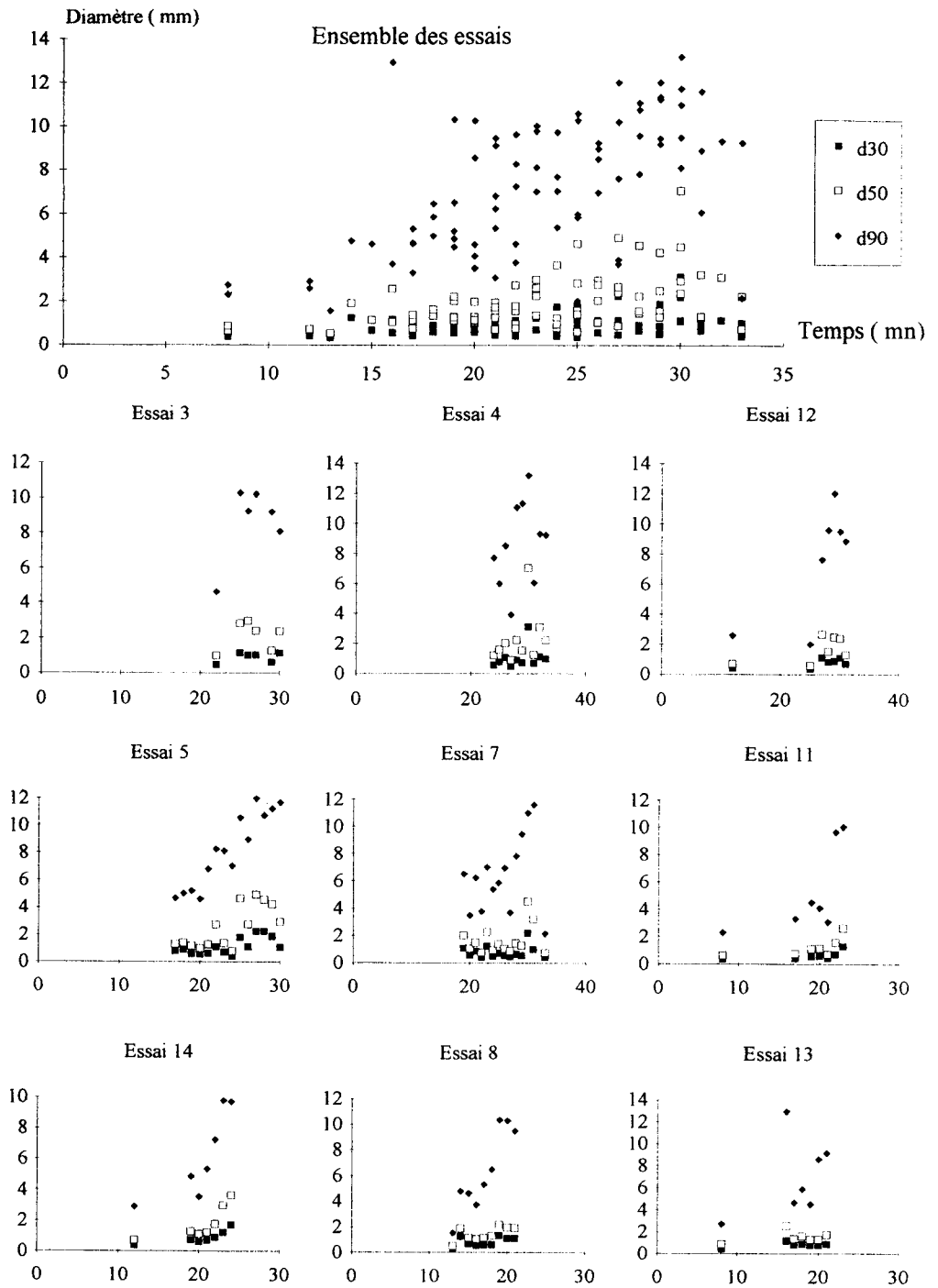


Figure 4-64 : déciles caractéristiques pour chacun des essais de dépavage en fonction du temps.

Au contraire, le transport des éléments de plus de 1 cm est beaucoup plus irrégulier et il ne se stabilise qu'en fin d'essai. Cette indépendance laisse penser que deux phénomènes distincts se produisent lorsque le débit augmente.

4.10.2. Granulométries

Evidemment, la granulométrie du lit ne subit aucune évolution sauf si l'essai est prolongé assez longtemps. On sort alors de l'étude du dépavage.

Comme indiqué au paragraphe précédent, la granulométrie transportée est très variable d'un prélèvement à l'autre. Ainsi, la figure suivante montre l'évolution de la granulométrie au cours du temps pour l'essai 7.

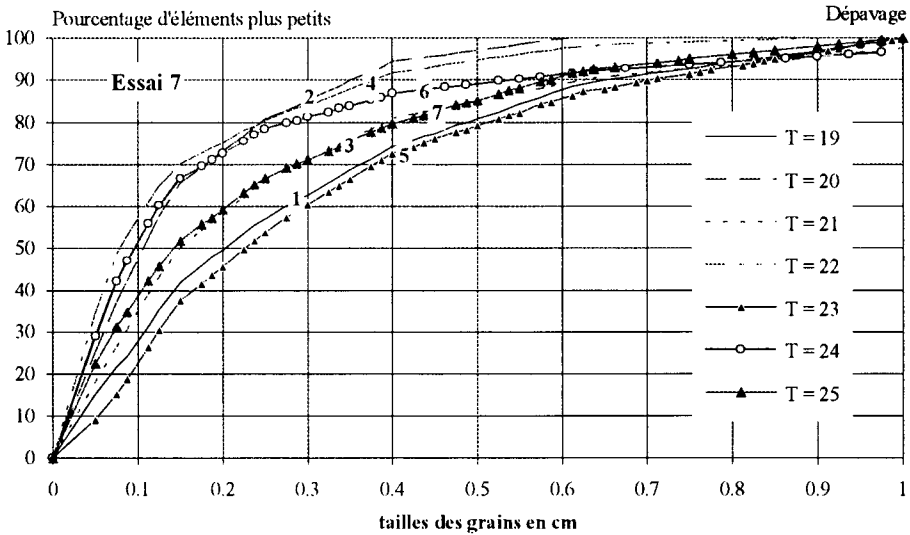


Figure 4-65 : Evolution de la granulométrie transportée durant l'essai 7.

Les chiffres correspondent à l'ordre chronologique.

De même, la figure 4-64 qui détaille trois déciles pour chacun des essais, montre de très fortes variations. Une première explication considère que les prélèvements sont réalisés ici avec un pas de temps d'une seule minute. Ils présentent donc une dispersion plus grande que les prélèvements des phases précédentes qui étaient réalisés avec un pas de temps d'au moins 2 mn (plusieurs dizaines de minutes durant la troisième phase).

Cependant, en regroupant les mesures deux à deux pour obtenir les valeurs moyennes sur deux minutes, il faut constater que la dispersion est réduite, mais qu'il est toujours difficile d'établir un sens de variation de la granulométrie en fonction du temps.

Ainsi, il semble que le dépavage est un phénomène plus discontinu que ceux qui interviennent pendant la formation du pavage ou il y a prise de contrôle du transport solide par le lit.

4.10.3. Processus physique

L'observation du chenal permet de distinguer clairement les deux phénomènes se déroulant dans le lit. D'une part, on retrouve le lessivage des éléments fins, la quatrième phase s'établissant alors dans la continuité de la précédente. Ainsi, il n'est pas étonnant que la fraction d'éléments fins transportés soit particulièrement stable.

L'autre phénomène concerne la couche "structurante" du lit et n'apparaît qu'à des débits supérieurs au débit nominal de l'essai. On observe que des blocs, mal intégrés à la couche de surface, sont arrachés de la surface. Un tel départ entraîne deux conséquences :

- Lors de son transport par l'écoulement, le bloc ébranle les éléments les plus gros de la couche superficielle du lit. De plus, par augmentation de la rugosité, il augmente la hauteur d'eau lors de son passage. Il a donc un effet déstabilisateur sur les sections du lit en aval.
- D'autre part, une cavité dans la couche de surface est créée lors du départ du grain, déstabilisant alors les éléments en amont. Ainsi, on observe généralement des paquets de grains qui sont arrachés, soit en même temps, soit après un court laps de temps. L'érosion des éléments fins alors découverts augmente encore le volume de la cavité et amplifie ce phénomène.

En amont, la surface du lit est privée d'appui et glisse. Ce phénomène ne peut se propager très loin car, lors du glissement, la porosité de la couche superficielle augmente, compensant ainsi le volume des grains arrachés.

Cependant, ce mouvement a détruit l'imbrication des grains. Ils se trouvent plus vulnérables à l'écoulement. En général, d'autres grains sont emmenés et le phénomène prend de l'ampleur jusqu'à retrouver une situation proche de la première phase, c'est à dire avec un transport solide intense sur une couche superficielle assez fine.

Evidemment, le mouvement de ces blocs est très irrégulier et leur déplacement est réalisé par paquets d'éléments grossiers. Cette irrégularité apparaît au niveau de la granulométrie du transport solide prélevée en aval du canal³⁶.

Il est difficile d'avoir une idée de la validité de ces observations dans la mesure où le débit liquide est linéairement croissant (0.017 l/s par minute) ce qui ne laisse aucun répit à la couche de surface. Cependant, il est apparu que le dépavage est un phénomène d'ensemble de la surface, la rupture d'une zone facilitant celle d'une autre portion du lit.

³⁶ De plus, lorsqu'un seul grain est arraché, il s'arrête assez souvent avant l'extrémité du canal car la surface du lit est assez grossière pour recueillir des grains de forte taille. Au contraire, un amas de blocs est beaucoup plus difficile à arrêter et rejoint souvent directement l'aval du modèle.

4.10.4. Critère de dépavage - Résultats

L'objectif de ces essais était de quantifier la résistance du lit obtenu dans les étapes précédentes. Il est alors nécessaire de définir un "critère de dépavage" qui permette d'associer un débit liquide au seuil de destruction de la couche superficielle.

Comme la description du phénomène physique le montre, il n'y a pas vraiment de rupture nette et ce dépavage se produit suivant une succession d'étapes plus ou moins rapides. Le choix du critère est alors important. Cependant, il ne s'agit pas ici de définir une valeur de débit critique pouvant conduire à la destruction de la couche de surface mais plutôt d'établir des comparaisons entre les essais.

Plusieurs seuils de débit solide ont donc été choisis, sur l'ensemble des matériaux ou sur la classe granulométrique la plus grossière :

- débit solide total supérieur à 10 g/mn,
- débit solide total supérieur à 50 g/mn,
- transport des éléments de plus de 1 cm de diamètre (q_{s100}) supérieur à 0.1 g/mn.

Le graphique suivant montre, pour chaque essai, les différents débits critiques obtenus en fonction du critère retenu. Il apparaît d'une part que le critère est important sur la valeur du débit critique mais qu'il est peu influent sur l'ordre des débits de dépavage³⁷.

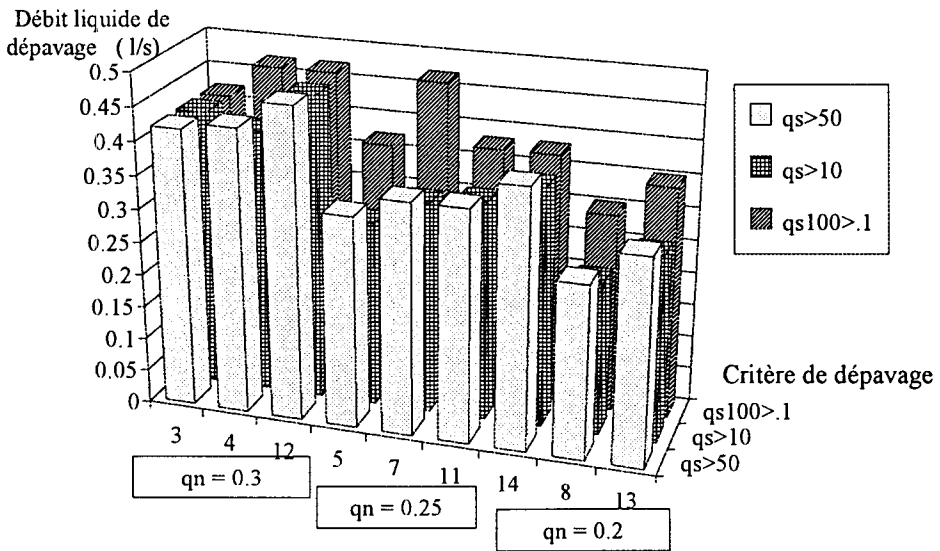


Figure 4-66 : Débits critiques de dépavage en fonction du critère retenu.

D'autre part, il apparaît nettement que le débit nominal a une influence sur la valeur du seuil de dépavage. Cependant, il faut se souvenir que, dans le cadre de ces essais, la pente est d'autant plus faible que le débit nominal est fort.

³⁷ On notera que le critère basé sur le débit solide des éléments de plus de 1 cm de diamètre est évidemment celui qui présente la plus forte dispersion.

Il est donc nécessaire, plutôt que de considérer le débit liquide comme paramètre, de prendre en considération la contrainte de cisaillement car elle fait intervenir la pente. La figure suivante montre la contrainte de cisaillement adimensionnalisée par le d_{50} du lit.

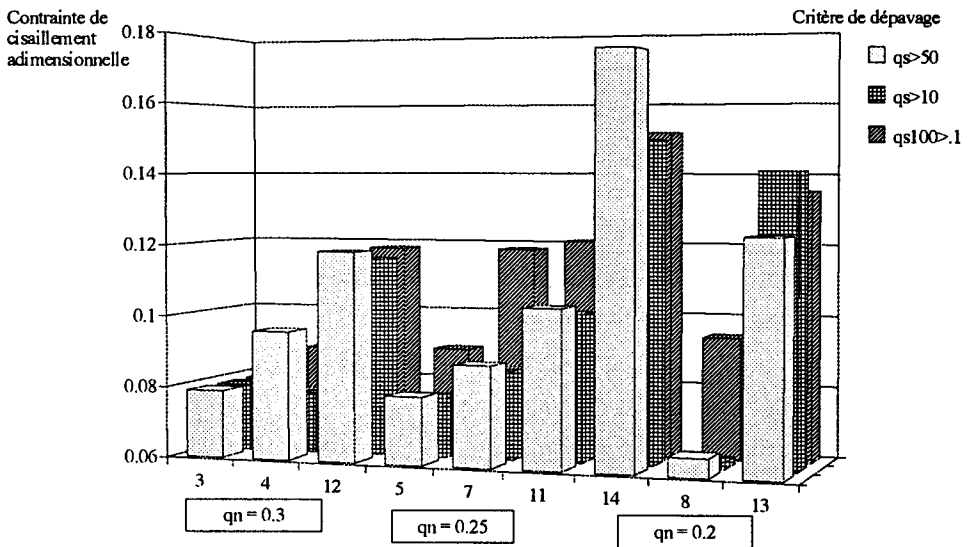


Figure 4-67 : Contrainte de cisaillement adimensionnalisée par le d_{50} du lit critique pour le début de dépavage.

Une première constatation montre que les valeurs de contrainte de cisaillement critiques mesurées sont nettement supérieures à celle obtenue par SHIELDS (0.06) ou MEYER PETER (0.047) puisque la moyenne sur l'ensemble des essais est de 0.098 pour un débit solide de 10 g/mn (soit environ 0.5 g/l). L'effet du pavage sur le mouvement des grains apparaît alors très nettement³⁸.

La tendance est l'inverse de celle observée avec le débit liquide : le lit pavé est d'autant plus résistant que le débit liquide nominal est faible. Cet aspect paradoxal a déjà été expliqué au paragraphe 4.9.3. En effet, si l'on compare les contraintes de cisaillement de début de dépavage et celle de fin de pavage, il n'apparaît plus d'écart en fonction du débit nominal mais seulement d'un essai à l'autre. Cette évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du débit nominal est donc directement liée au phénomène de la formation du pavage.

³⁸ Cependant, la moyenne des rapports d_{90}/d_{50} étant de 2.32, on obtient une contrainte de cisaillement adimensionnelle de 0.042 pour le d_{90} du lit ce qui est tout à fait en rapport avec les valeurs usuellement retenues. Cependant, il faut noter qu'il ne s'agit que d'un artifice de calcul, tous les auteurs s'accordant à considérer que la mobilité d'un mélange de granulométrie étendue est de l'ordre de celle des grains d'un diamètre proche du d_{50} (étant donnée la forme de la courbe granulométrique, d_{50} et diamètre moyen sont très proches).

Il est cependant apparu que les contraintes de cisaillement de début de dépavage étaient, en moyenne, de 15 à 35 % supérieures³⁹ à celles de fin de pavage.

D'autre part, il semble que les essais en canal de 1 m de long correspondent à des valeurs beaucoup plus élevées de la contrainte de cisaillement que pour un canal plus long. Cette situation correspond à une pente et une hauteur d'eau un peu plus fortes, une granulométrie du lit plus fine dans le cas d'un canal court.

Il semblerait donc que la structuration des grains soit plus prononcée dans le cas du canal court et qu'elle présente une résistance à l'écoulement plus élevée. Cependant, il est difficile de justifier cet écart, et il est probable qu'il soit directement lié à l'écart de granulométrie du lit à la fin de la troisième phase.

D'autre part, de nombreux auteurs⁴⁰ considèrent que le sable, en faible quantité, facilite le transport solide des éléments plus grossiers. Ainsi, dans un canal long, le transport par sable dans la partie aval est important car les éléments fins sont arrachés à l'amont.

Finalement, l'interprétation des essais de dépavage est difficile d'une part à cause de la dispersion importante que l'on observe lors de la destruction du lit, et d'autre part parce qu'il est difficile de définir un paramètre (débit ou contrainte de cisaillement) traduisant la résistance du lit à l'écoulement.

Dans la fourchette réduite des conditions hydrauliques de ces essais, il apparaît que le débit liquide de formation du pavage n'a qu'une faible influence sur la structuration du lit.

³⁹ En fonction du critère de dépavage retenu.

⁴⁰ Ainsi, LISLE (1990) relate les travaux d'ISEYA & IKEYA selon lesquels le sable dans de faibles proportions peut augmenter le transport de graviers par la création locale de surfaces lisses. Cet avis est assez généralement partagé - et conforté par les observations durant la première phase - mais n'a pas été quantifié.

4.11. Conclusion

Ces essais en canal étroit ont mis en évidence trois processus distincts liés au charriage torrentiel⁴¹ :

- Le charriage hyperconcentré correspond à la **capacité maximale de transport**. Il se produit pour des contraintes de cisaillement très supérieures au seuil de début de transport. C'est le type de charriage le plus connu. Il est uniquement gouverné par les conditions hydrauliques (en fait il y a interaction) et il affine le lit pour faciliter le transport : l'écoulement est alors très rapide et le nombre de Froude dépasse largement l'unité malgré une forte dispersion. Contrairement aux approches classiques, les éléments sont d'autant plus facilement transportés qu'ils sont gros (et que leur diamètre reste inférieur à la hauteur de mélange). On retrouve ici la notion de pavage mobile^d (voir le paragraphe 2.7.9 étudié - entre autres - par KUHNLE & SOUTHARD (1988) et IKEDA & ISEYA (1988) et SUZUKI & KATO (1989).
- Le second phénomène correspond à un **lessivage** du lit : L'écoulement, à la faveur de fluctuations turbulentes, arrache tous les éléments fins qu'il peut atteindre. Dans ce cas, le facteur prépondérant est la structure du lit, seuls les éléments fins pouvant être déplacés. Les formes du lit semblent avoir un rôle prépondérant dans les pertes de charge. Le nombre de Froude oscille alors autour de l'unité.
- Le troisième phénomène correspond à **l'agencement des grains dans la couche de surface**. Il est cependant nécessaire de distinguer la formation d'une couche pavée de sa destruction. Dans le premier cas, le transport par amas de blocs et leur capacité à s'entraider pour résister à l'écoulement sont prépondérants. Cependant, ils ne peuvent rester durablement en place que si la surface du lit, dans son ensemble, est assez résistante pour éviter les affouillements en aval des amas. Lorsque le pavage est détruit, un autre processus se produit : la couche de surface est progressivement déstructurée, l'arrachement de quelques grains préparant, par glissements successifs, l'érosion individualisée de grains qui s'appuyaient les uns sur les autres auparavant.

Durant cette évolution la mobilité relative des classes granulométriques s'inverse (les éléments grossiers deviennent plus difficiles à transporter et les fins plus mobiles). Cependant, le fait le plus marquant concerne la bi-stabilité granulométrique^d de ce phénomène : une fois engagé, il apparaît que le processus est condamné à s'emballer, les classes granulométriques les plus représentées dans le lit étant celle qui ont la plus faible mobilité. Ainsi, sur un lit de matériaux fins, le transport des éléments grossiers est beaucoup plus facile que lorsque le lit est parsemé de blocs. On verra que ce caractère instable joue un rôle important dans la dynamique torrentielle.

Ainsi, il apparaît qu'il n'est pas possible d'éviter de se situer par rapport à ces trois phénomènes lorsque l'on étudie le tri granulométrique. On comprend alors que, suivant les auteurs, la mobilité évolue dans des sens contraires lorsque la taille des grains

⁴¹ Par charriage torrentiel on entend l'ensemble des phénomènes de charriage qui se déroulent en torrent, au contraire du charriage hyperconcentré qui concerne seulement un des aspects du charriage torrentiel. Les définitions de ces différents termes se trouvent dans le glossaire.

augmente puisque, suivant les conditions opératoires, le phénomène physique étudié est différent.

Pour de faibles pentes et une taille de grain réduite, DISPLAS (1986) a intégré les conditions hydrauliques dans le calcul de son coefficient de masquage. Il obtient lui aussi un changement de comportement, les éléments grossiers étant plus facilement transportés que les fins lorsque la contrainte de cisaillement adimensionnelle du d_{50} dépasse de 20 % la valeur critique pour le d_{50} .

L'objectif de ces essais était de comprendre la physique du charriage à forte pente. Il a été possible de mieux cerner les phénomènes élémentaires se produisant dans un torrent. De plus, un modèle numérique sommaire décrivant l'évolution locale du lit et du transport solide dans un lit torrentiel a été réalisé.

Les résultats concernant ce modèle très partiel se trouvent à l'annexe IV.

Deux aspects en limitent la portée :

- D'une part les conditions expérimentales correspondent à une fourchette trop étroite (pente, débit, granulométrie...) pour pouvoir établir des relations robustes.
- D'autre part, aucune équation traduisant l'interaction entre conditions hydrauliques et transport solide n'existe dans la littérature.

Ces essais concernent un écoulement monodimensionnel dans un canal de faible longueur. Ils correspondent donc à une approche ponctuelle des phénomènes. Or, d'autres processus rentrent probablement en jeu lorsque l'écoulement a la possibilité de divaguer. Une autre série d'essais a donc été conduite afin de mettre en lumière les différences de comportement lorsque la largeur disponible n'est plus limitée. C'est l'objet du chapitre suivant.

4.12. Liste des figures

Figure 4-1 : Photo du canal et de la plate-forme	211
Figure 4-2 : déroulement en trois étapes d'un essai (essai 12).	212
Figure 4-3 : Mesures granulométriques de la granulométrie de base (suivant 3 échantillons).....	214
Figure 4-4 : Evolution du débit solide (en g/mn) en fonction du temps pour chacun des essais.....	216
Figure 4-5 : Evolution du débit solide dans le cas des essais en canal de 1 m de long.....	217
Figure 4-6 : Evolution de la vitesse du fluide durant chaque essai en fonction du temps.....	218
Figure 4-7 : comparaison des débits solides en fonction du débit nominal	219
Figure 4-8 : Evolution de la hauteur du fluide durant chaque essai en fonction du temps.....	220
Figure 4-9 : Pente finale des essais en canal étroit en fonction du débit nominal. On a distingué les essais en canal court de ceux réalisés en canal long.....	221
Figure 4-10 : Evolution du nombre de Froude durant chaque essai en fonction du temps.....	222
Figure 4-11 : Volume total transporté durant les essais en canal étroit en fonction du débit nominal (on y a inclus l'essai 15).	223
Figure 4-12 : Evolution de la submersion relative (h/d_{90}) durant chaque essai en fonction du temps.	224
Figure 4-13 : Evolution du d_{30} des matériaux transportés durant chaque essai en fonction du temps.	226
Figure 4-14 : Evolution du d_{50} des matériaux transportés durant chaque essai en fonction du temps.	228
Figure 4-15 : Confrontation de la granulométrie du lit avec les conditions d'écoulement à travers le coefficient de Strickler.	229
Figure 4-16 : Evolution du d_{90} des matériaux transportés durant chaque essai en fonction du temps.	230
Figure 4-17 : Evolution du coefficient de friction en fonction de la submersion relative durant chaque essai.	232
Figure 4-18 : Comparaison des valeurs mesurées et calculées de λ à partir de l'équation de Limerions.	233
Figure 4-19 : Résultat des calculs de λ basés sur la formule de Thompson & Campbell.....	234
Figure 4-20 : Calcul de la vitesse de l'écoulement en utilisant la formule de Griffiths à partir de la granulométrie du lit.	235

Figure 4-21 : Comparaison de la granulométrie transportée et de celle du lit à travers le d50 en fonction du débit solide.....	236
Figure 4-22 : Valeur du coefficient de perte de charge calculé avec la formule de Smart & Jaeggi (1983).....	237
Figure 4-23 : rapport calculé / mesuré en fonction du débit solide (formule de Smart & Jaeggi).....	238
Figure 4-24 : Confrontation du calcul du coefficient de friction à partir de l'équation de Smart & Jaeggi et la granulométrie transportée avec les valeurs observées.....	239
Figure 4-25 : Confrontation du calcul du coefficient de friction à partir des équations de Meunier et de Rickenmann.....	240
Figure 4-26 : Calcul du débit solide avec la formule de Meyer-Peter en considérant le diamètre moyen du lit.....	243
Figure 4-27 : Calcul du débit solide avec la formule de Meyer Peter en considérant le d90 du lit.....	244
Figure 4-28 : Situation des essais réalisés par rapport au domaine couvert par les expériences de Smart & Jaeggi.....	245
Figure 4-29 : Calcul du débit solide par la formule de Smart & Jaeggi à partir de la granulométrie du lit.....	246
Figure 4-30 : Calcul du débit solide au moyen de la formule de Bathurst et al. en utilisant le d50 du lit.....	247
Figure 4-31 : Débit solide calculé par la formule de Sogreah en considérant la granulométrie du lit.....	248
Figure 4-32 : Débit solide calculé par la formule de Sogreah lorsque le seuil de début de mouvement calculé n'est pas atteint.....	249
Figure 4-33 : Evolution de la probabilité de mouvement d'un grain de la couche active.....	253
Figure 4-34 : Calcul de la probabilité de mouvement avec une épaisseur de la couche active égale au d90.....	254
Figure 4-35 : évolution de la fréquence des classes 0.16 - 0.25 et 0.25 - 0.40 en fonction du temps.....	256
Figure 4-36 : Evolution de l'indice de mobilité relative en fonction du temps pour l'ensemble des essais.....	257
Figure 4-37 : Débit solide durant la première phase.....	258
Figure 4-38 : Confrontation du débit solide mesuré avec la formule de Meunier.....	259
Figure 4-39 : Rapport du d90 transporté par le d90 du matériau de base en fonction du débit solide.....	260
Figure 4-40 : Granulométrie du lit durant l'essai 5.....	260
Figure 4-41 : Indices de mobilité relatifs pour l'ensemble des essais.....	261

Figure 4-42 : Photo du lit durant la première phase d'un essai.	263
Figure 4-43 : Comparaison des fréquences des classes 0.02 - .0315 cm et 0.63 - 1 cm durant la première phase.	265
Figure 4-44 : Confrontation du débit solide mesuré et du débit solide calculé par la formule de Sogreah.	267
Figure 4-45 : Evolution du nombre de Froude calculé durant la seconde phase des essais.	268
Figure 4-46 : Evolution de la hauteur d'eau et de la hauteur de mélange.	269
Figure 4-47 : Contrainte de cisaillement adimensionnelle durant la seconde phase.	270
Figure 4-48 : comparaison de la granulométrie transportée avec la granulométrie de base durant la deuxième phase.	271
Figure 4-49 : Evolution de la granulométrie transportée durant la phase 2 de l'essai 6.	272
Figure 4-50 : Comparaison des fréquences des classes 0.02 - .0315 cm et 0.40 - 1 cm durant la deuxième phase.	272
Figure 4-51 : Evolution de la granulométrie du lit durant la phase 2 de l'essai 9.	273
Figure 4-52 : Evolution de l'indice de mobilité relative en fonction du temps pour l'ensemble des essais.	274
Figure 4-53 : Mobilité de chaque classe granulométrique en fonction de sa fraction dans le lit pour l'ensemble des essais.	275
Figure 4-54 : Schéma d'évolution de la granulométrie du lit à partir de l'indice de mobilité relative.	275
Figure 4-55 : Evolution du débit solide durant la troisième phase.	278
Figure 4-56 : Contrainte de cisaillement adimensionnelle durant la troisième phase.	279
Figure 4-57 : Evolution de la granulométrie transportée durant l'essai 8.	280
Figure 4-58 : Granulométrie finale du lit pour l'ensemble des essais.	281
Figure 4-59 : Contrainte de cisaillement adimensionalisée par le d50 du lit en fin d'essai pour chacun des essais.	282
Figure 4-60 : diamètre moyen final mesuré et diamètre moyen calculé à partir des conditions hydrauliques pour chaque essai.	283
Figure 4-61 : Déroulement d'un essai de dépavage.	285
Figure 4-62 : Débit solide (ensemble des matériaux, classe granulométrique des éléments les plus grossiers et classe granulométrique des éléments les plus fins) pour chacun des essais en fonction du temps.	286
Figure 4-63 : Relation entre vitesse de l'écoulement et débit solide pour l'ensemble des essais.	287

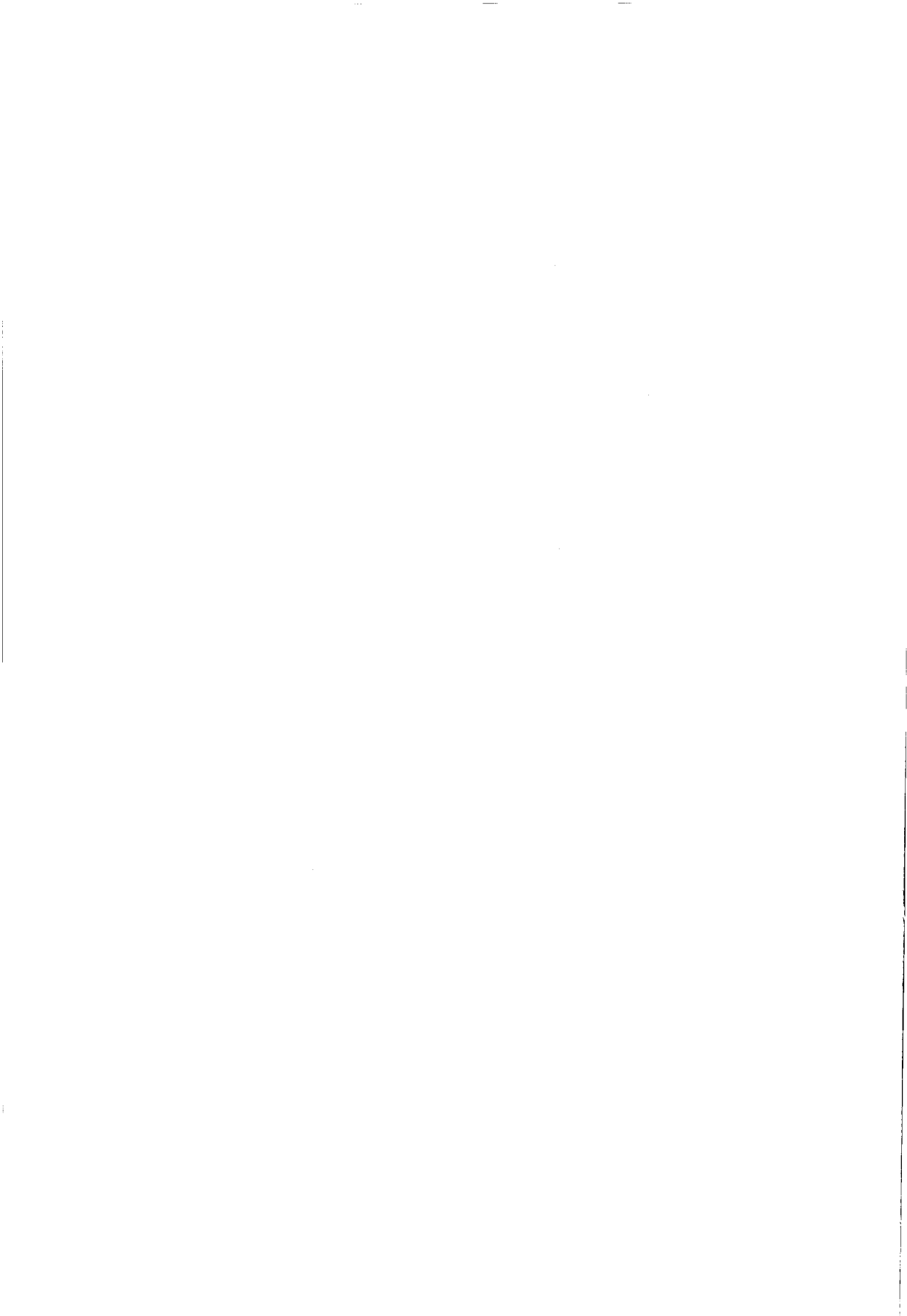
Figure 4-64 : déciles caractéristiques pour chacun des essais de dépavage en fonction du temps.288

Figure 4-65 : Evolution de la granulométrie transportée durant l'essai 7.....289

Les chiffres correspondent à l'ordre chronologique.289

Figure 4-66 : Débits critiques de dépavage en fonction du critère retenu.....291

Figure 4-67 : Contrainte de cisaillement adimensionnée par le d50 du lit critique pour le début de dépavage.....292



1 - Introduction - Généralités

2 - Analyse bibliographique

3 - Méthodes de mesure

4 - Effet local d'un écoulement d'eau claire
sur un lit de granulométrie étendue

**5 - Passage
d'une modélisation monodimensionnelle
à une approche bidimensionnelle**

Sommaire

5.1. Objectifs - Importance des expérimentations.....	303
5.2. Mode opératoire.....	305
5.2.1. Canal utilisé.....	305
5.2.2. Conditions hydrauliques.....	307
5.2.3. Processus opératoire.....	307
5.2.4. Essais avec recyclage.....	309
5.2.5. Particularités de chacun des essais	310
5.3. Observations expérimentales des essais de formation du lit.....	313
5.3.1. Approche globale.....	313
5.3.2. Première phase.....	313
5.3.3. Deuxième phase.....	319
5.3.4. Troisième phase.....	323
5.4. Structures morphologiques élémentaires d'un lit pavé.....	325
5.4.1. Introduction	325
5.4.2. Bras multiples et méandres.....	326
5.4.3. Largeur du lit mineur	328
5.4.4. Alternance seuil - mouille	329
5.5. Phase de dépavage du lit.....	329
5.6. Essais de formation du pavage avec recyclage.....	333
5.7. Conclusion	335
5.8. Liste des figures.....	336

5.1. Objectifs - Importance des expérimentations

Le chapitre précédent était destiné à apporter une compréhension très localisée des mécanismes se déroulant à l'interface écoulement-lit. Il s'agissait d'une approche extrêmement simplifiée des phénomènes complexes qui se déroulent dans la nature et il est très difficile d'appliquer directement au terrain les conclusions issues des observations réalisées. D'autre part, il est apparu que le caractère monodimensionnel^d de l'écoulement influençait grandement les résultats obtenus et limitait le développement de structures morphologiques (chapitre 4).

Ainsi, la seconde étape de ce travail consiste, en augmentant la largeur du modèle, à étudier les phénomènes directement liés aux divagations de l'écoulement. Là encore, il s'agit de mettre en lumière les différents mécanismes se déroulant à l'interface écoulement - lit et non pas de proposer une nouvelle formule. Ensuite, les essais sur modèles seront encore affinés en simulant des cycles de crue sur une vaste zone de dépôt (chapitre 6).

L'intérêt d'isoler les phénomènes liés aux divagations est largement justifié par les lacunes des approches classiques. En effet, dans le cadre de travaux de recherche, la plupart des essais sont réalisés dans un canal assez étroit pour pouvoir considérer que l'écoulement est monodimensionnel. Cette approche présente de multiples avantages pratiques¹.

Cependant, il suffit d'observer un cours d'eau pour comprendre que, dans la nature, les phénomènes ne sont pas seulement monodimensionnels mais que l'écoulement possède souvent la liberté de divager. Or, la restriction artificielle de la largeur d'écoulement est probablement assez influente pour que le comportement du torrent soit différent.

La démarche de LEFORT (1991) illustre parfaitement cette constatation : refusant de considérer des caractéristiques locales (débit unitaire, contrainte de cisaillement...) il privilégie le débit liquide total ayant observé que les lits alluviaux ne sont pas une contrainte pour l'écoulement, mais plutôt un résultat des phénomènes hydrauliques.

D'autre part, l'étude de l'influence des divagations est particulièrement importante car elle doit guider l'application des formules établies pour un écoulement monodimensionnel aux cas de terrain où les déplacements latéraux sont possibles.

Enfin, une meilleure connaissance du comportement d'un torrent ou d'une rivière torrentielle lorsqu'ils ont la possibilité de divager est importante dans la mesure où elle peut guider la conception d'ouvrages de protection. Il est par exemple important de savoir comment évolue la capacité de transport du cours d'eau après traversée d'une zone de divagation.

^d Ce signe signale les termes définis dans le glossaire.

¹ En effet, il suffit d'un petit canal, d'un volume de matériaux réduit pour pouvoir réaliser des essais. L'appareillage de mesure est lui aussi très simple (mesure des profils longitudinal et transversal, dispositifs d'entrée et de sortie du canal...).

D'autre part, les essais sont d'autant plus rapides et plus répétitifs que le canal est étroit et la préparation du lit ne pose pas de réels problèmes. Enfin, le traitement des données et leur interprétation sont nettement simplifiés.

Des essais identiques aux précédents ont été réalisés en modifiant un seul paramètre : la largeur disponible pour l'écoulement. Il est ainsi possible de montrer l'effet des divagations sur le comportement général du lit.

Les expérimentations ont donc été conduites de façon à être aussi proches que possible des conditions rencontrées lors des essais en canal de 10 cm de largeur. On trouvera au chapitre 4 tous les renseignements sur les conditions opératoires. Seules les particularités des essais conduits en canal large sont abordées dans ce paragraphe.

Cependant, faute d'une instrumentation suffisante, les mesures réalisées ne permettent pas de suivre suffisamment les phénomènes pour en avoir une description quantitative : les mesures sont trop incomplètes pour pouvoir construire une approche du phénomène mais suffisantes pour tester la cohérence avec les mesures obtenues en canal étroit.

D'autre part, afin de cerner la réalité torrentielle à partir d'expérimentations simples, des essais avec recyclage des matériaux ont été réalisés. Ils sont exposés au paragraphe 5-6.

5.2. Mode opératoire

5.2.1. Canal utilisé

On utilise dans le cadre de ces essais le même canal que précédemment, avec le même matériau, mais la largeur disponible a été portée à 60 cm.

Le choix de la longueur est plus difficile. La longueur du canal lors des essais précédents était de 1 m ou de 2 m. L'objectif étant de conduire les essais dans un canal aussi court que possible (étude de phénomènes ponctuels) mais assez long pour que les effets de bord et les erreurs de mesure soient négligeables.

Il se rajoute maintenant une contrainte par rapport au cas précédent : il faut que le canal soit assez long pour que les structures morphologiques puissent se développer. L'observation de crues dans des conditions similaires sur la plate-forme torrentielle a montré que des structures morphologiques se développaient à partir d'une distance de l'ordre du mètre².

Ici, l'objectif est d'étudier l'influence des divagations élémentaires. Une longueur de 2 m est donc justifiée dans la mesure où elle permet d'individualiser l'influence de dépôts latéraux sans la brouiller avec d'autres phénomènes de plus grande ampleur. Pour éviter les effets de bord, la longueur du canal est maintenue à 2 m durant ces essais. De plus, elle permet une confrontation directe avec les observations en canal de 10 cm de large.

Le canal était équipé des instruments suivants :

- un dispositif d'alimentation amont formé d'un radier bétonné avec une pente de 18 %. Le raccordement au lit de pente variable se fait par une fosse de dissipation à fond bétonné. Les matériaux solides sont injectés dans cette fosse.
- Un seuil aval fixe de 60 cm de largeur,
- Une règle permettant de suivre la cote du lit à l'extrémité amont. De plus, il était possible, en se référant aux parois latérales du canal, de mesurer la cote de n'importe quel point et, en particulier, d'effectuer des profils longitudinaux.
- Les mesures de vitesse par suivi d'un passage de sel nécessitent l'utilisation d'électrodes mobiles : ce sont donc des fils de cuivre qui sont employés dans ce cas.

La photographie suivante montre le canal avant l'essai 21.

² La notion d'échelle de structure morphologique est très délicate. En effet, une observation attentive sur un modèle de grande taille ou sur le terrain montre plutôt une imbrication de structures d'échelles différentes. Cette diversité présente certaines similitudes avec les échelles de tourbillons dans les écoulements turbulents. Il est en effet apparu durant les essais sur la plate forme torrentielle des structures couvrant plusieurs m² (c'est à dire plusieurs ha en nature!!!) alors que d'autres ne n'occupent que quelques cm² - soit quelques m² en nature. Ces phénomènes seront abordés au chapitre suivant.



Figure 5-1 : Vue d'ensemble du canal avant l'essai 21.

La largeur dans ce cas est de 60 cm ce qui est largement suffisant pour laisser à l'écoulement la liberté de divaguer. Cependant, pour éviter que l'écoulement ne suive trop souvent les parois latérales, le lit initial présente des bords relevés aux limites du canal. Ainsi, la largeur effective est généralement réduite à 50 cm. Il est en effet apparu qu'une fois qu'un méandre est formé, il attaque la berge externe suivant le schéma classique de propagation. Les talus extérieurs, de même granulométrie que l'ensemble des matériaux, limitent ce phénomène sans changer le comportement global de l'écoulement. La figure suivante montre le profil transversal du canal :

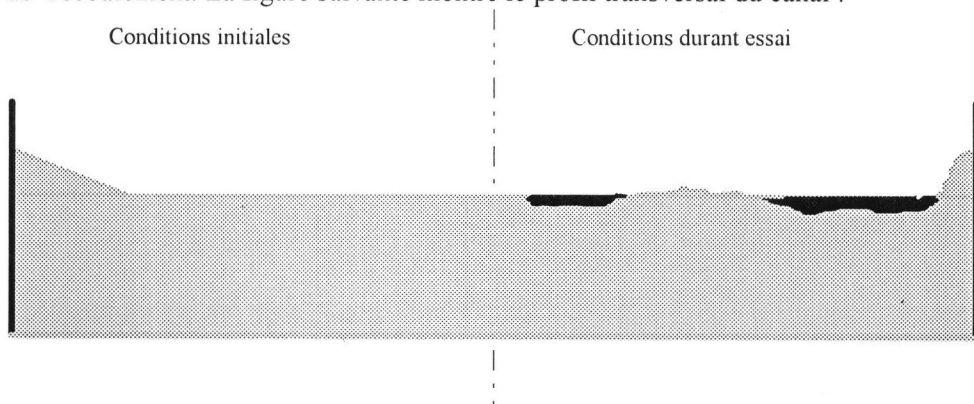


Figure 5-2 : Section transversale du canal avant et pendant essai.

5.2.2. Conditions hydrauliques

Des essais préliminaires ont montré qu'avec la pente et la granulométrie utilisées, il n'est pas possible d'obtenir un pavage significatif si le débit liquide est inférieur à 0.3 l/s. Or il s'agit là de la plus forte valeur utilisée lors des essais avec une largeur de 10 cm.

Ainsi, les essais en canal large ont été conduits avec des débits variant entre 0.3 et 0.4 l/s. D'autre part, afin d'obtenir un lit de morphologie crédible, il faut commencer l'injection de matériaux avec un retard d'environ une minute par rapport au débit liquide. En effet, si le lit ne s'enfonce pas (d'environ 1/2 cm) dans un premier temps, il se crée, avec l'injection du matériau solide, un cône de dépôt de matériaux grossiers³ qui force l'écoulement vers un bord du canal.

5.2.3. Processus opératoire

Les étapes des essais sont exactement les mêmes que dans le cadre du canal étroit sauf pour les essais avec recyclage qui sont détaillés par la suite.

Les principales différences concernent le relevé de la pente. En effet, le suivi du profil en long est plus difficile - car largement arbitraire - dans le cas d'un écoulement divaguant. Ainsi, seule la pente moyenne a été relevée de façon systématique. Cependant, des mesures de la surface de l'écoulement ont été réalisées durant les essais en distinguant l'écoulement principal des bras secondaires.

La figure suivante montre le profil en long en fin de phase de pavage pour quatre essais :

³ On trouve ici un problème caractéristique des modèles réduits : les quatre paramètres pente, débit liquide, débit solide et granulométrie ne sont pas indépendants. Or le débit liquide à un endroit donné est généralement très variable durant les essais. Ainsi, il semblerait que les matériaux injectés (de même granulométrie que le lit) soient un peu trop gros dans ce cas par rapport aux conditions hydrauliques. Cependant, il s'agit seulement d'une tendance peu marquée car ce dépôt est d'ampleur limitée.

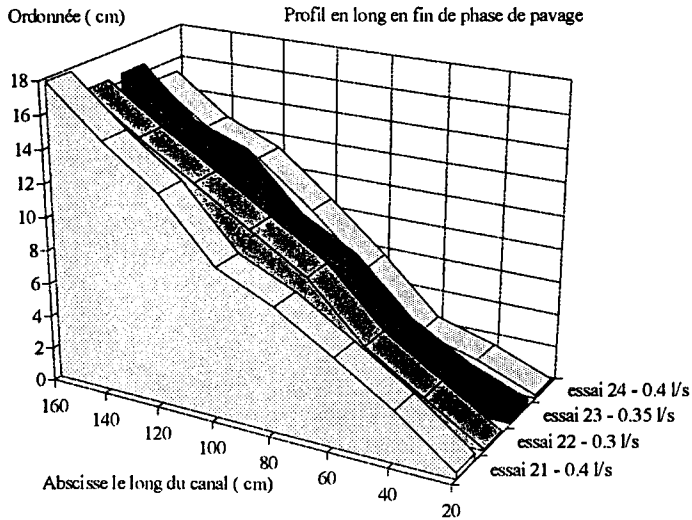


Figure 5-3 : Profil en long pour les quatre premiers essais.

La comparaison avec la figure 3-23 montre que le profil longitudinal est moins régulier que dans le cas d'un écoulement en canal étroit. Cependant, ces mesures présentent un caractère arbitraire car l'opérateur choisit dans le transect le point de mesure. De plus, la mesure est trop difficile pour être significative lorsque le lit se déplace.

Dans le cas d'un écoulement large, la section mouillée n'est plus connue. Il n'est alors plus possible de déduire la hauteur d'eau à partir de la vitesse et du débit total. D'autre part, la vitesse est très variable d'un site de mesure à l'autre. Les mesures ont donc été réalisées essentiellement dans l'objectif d'étendre à un lit divagant la méthode employée en canal étroit.

De même, seules quelques granulométries du lit ont été mesurées. En effet, au contraire des essais précédents, l'hypothèse d'une couche active de granulométrie uniforme n'est plus acceptable lorsque l'écoulement peut divaguer. En effet, nous verrons qu'il dépose des amas de granulométrie ressermée sur des épaisseurs très variables et que les échanges entre lit et écoulement ne se produisent pas que dans le lit mineur. Il est alors difficilement possible - même au prix d'approximations - de faire l'hypothèse d'une couche active dans le cadre de ces essais⁴.

⁴ En fait, la notion de couche active est associée à un pas de temps et d'espace. Lors du suivi global d'un bief à l'échelle d'une crue, ou d'une succession de crues, il est possible de considérer une granulométrie homogène sur une vaste surface. Cette approximation est encore plus facile lorsque des versants et un fond rocheux limitent la masse de sédiments dans le lit. Cependant, dans notre cas, l'objectif est de suivre l'évolution de la granulométrie du lit durant la crue. Comme il n'y a plus de lien direct entre cette granulométrie et l'historique de la granulométrie transportée à cause des dépôts latéraux de granulométrie ressermée, l'hypothèse d'une couche active d'épaisseur et de granulométrie homogène ne peut être retenue.

La possibilité de suivre la granulométrie du lit ne peut être envisagée simplement. Il s'agit non seulement des variations durant l'essai mais aussi de la granulométrie en fin d'essai, le lit présentant une telle hétérogénéité que la mesure de sa granulométrie est trop difficile⁵.

Il a fallu se contenter de mesures d'échantillons superficiels. L'incertitude est alors nettement plus grande.

Cependant, la granulométrie du lit mineur a été déterminée systématiquement durant les essais 21, 22 & 23.

Par contre, il est toujours possible de connaître la granulométrie transportée avec la même précision que lors des essais en canal étroit. Ces mesures ont donc été réalisées avec la même rigueur.

L'hydrogramme est le même qu'avec le canal étroit (figure 4.2), pour les quatre étapes des essais. Seul le débit nominal et la durée des essais diffèrent sensiblement.

5.2.4. Essais avec recyclage

Tous les essais précédents ont été réalisés avec coupure totale de l'alimentation amont en matériaux à la fin de la première phase. Or, c'est un cas qui ne se produit qu'exceptionnellement en torrent. Cette hypothèse a cependant été retenue en considérant que les phénomènes de pavage étaient si peu connus qu'il était nécessaire de simplifier le problème des apports amont dans une première étape. Cette simplification s'impose d'autant plus que le transport solide à proximité du seuil de début de mouvement est mal connu.

Une autre démarche, très employée, consiste à ré-injecter à l'amont du modèle les matériaux sortants. Le recyclage des matériaux revient à admettre que la section de lit étudiée reçoit un transport solide imposé par l'écoulement. Or il s'agit d'une hypothèse considérable pour les débits formateurs du pavage, puisque l'indétermination du transport solide provient essentiellement du rôle joué par les influences extérieures au torrent.

D'autre part, ce fonctionnement s'oppose au rôle régulateur et au tri se déroulant dans le lit : les matériaux injectés à l'amont du modèle sont ceux qui sont parvenus à l'aval. Si cette hypothèse est légitime pour les longues rivières, elle est sans rapport avec les processus de tri et d'usure qui modifient le fonctionnement du torrent au point d'en changer la caractéristique principale : la pente. Ainsi, les mesures de terrain ont montré qu'en absence d'influence extérieure, la pente des torrents varie de façon significative sur une distance de l'ordre d'une centaine de mètres, soit un mètre à l'échelle des matériaux employés ici.

Enfin, le recyclage des matériaux s'oppose artificiellement à l'érosion du lit : le débit solide ne s'arrête que lorsque tous les matériaux sont déposés. C'est évidemment une situation contraire à celle que l'on peut observer lors de la formation du pavage sans transport solide provenant de l'amont.

⁵ On a ici un aperçu de la difficulté de mesure de la granulométrie sur le terrain. Le chapitre 7 reviendra largement sur cette variabilité.

Cependant, la réalisation d'essais suivant deux conditions extrêmes (apport amont nul et recyclage) permet de mieux cerner la variabilité de la relation débit solide-conditions hydrauliques à proximité du seuil de transport. En effet, le recyclage augmente artificiellement le débit solide et celui-ci reste lié aux conditions d'écoulement. Nous avons donc réalisé deux essais en recyclant les matériaux. Les résultats correspondant sont présentés au paragraphe 5.6.

5.2.5. Particularités de chacun des essais

Après un essai n°20 destiné à observer le comportement du lit, l'essai 21 a été le premier pour lequel des mesures systématiques ont été réalisées. Il présente les particularités suivantes :

- Son hydrogramme schématisé se trouve ci dessous :

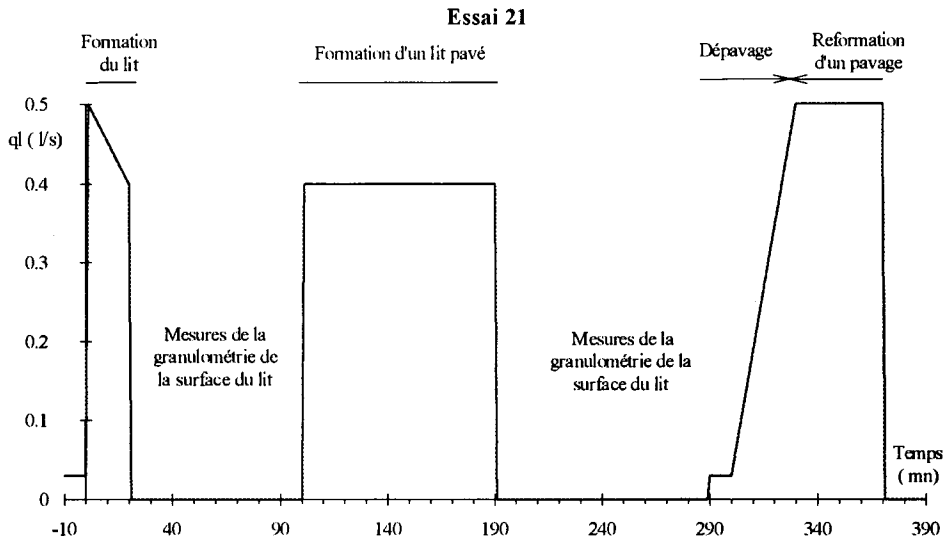


Figure 5-4 : Schéma de l'essai 21

- La formation du lit a duré 20 mn pour obtenir une morphologie plus "crédible". Cependant, il est apparu qu'une première phase durant 10 mn était largement suffisante et qu'il n'y avait pas de modification du dessin général du lit si cette première étape était prolongée.
- D'autre part, pour le dépavage de cet essai, le débit est resté pendant 70 mn à 0.5 l/s pour reformer un pavage après destruction du précédent. Même s'il apparaît un pavage et que le lit n'est plus modifié dans sa structure, le débit solide reste encore à la valeur de 10 g/mn au bout de 70 mn. Pour ce second pavage après destruction du premier lit, il n'y a plus d'évolution notable de la granulométrie sortante après le dépavage qui s'est produit 30 minutes après le début de l'essai de dépavage. Ainsi, malgré une diminution de la pente, la formation du pavage n'a pas commencé après 70 mn d'écoulement à débit constant. Durant le dépavage, la pente évolue de la façon suivante :

Durée depuis le début de l'essai de dépavage	0	40	51	65
Pente moyenne (%)	12	10.5	9.9	9.8

Les essais suivants ont été conduits en respectant le même protocole qu'avec un canal étroit. Leurs principales caractéristiques sont regroupées ci dessous :

	essai prelimi.	essais sans recyclage			essais avec recyclage	
Numéro d'essai	21	22	23	24	25	26
Débit nominal (l/s)	0.4	0.3	0.35	0.4	0.3	0.4
Volume injecté (l)	7.2	4	6	9.2	3.6	
Durée totale (mn)		159	50	122	110	
Pente initiale (%)	12.1	11.3	10.9	10.8	10.4	
Pente finale (%)	12.0	10.6	10.4	10.1		
Largeur moyenne au miroir (cm)		24.8	24.5	24.8		
Largeur moyenne du lit principal (cm)		15.1	17.6	18.8		

Débit solide

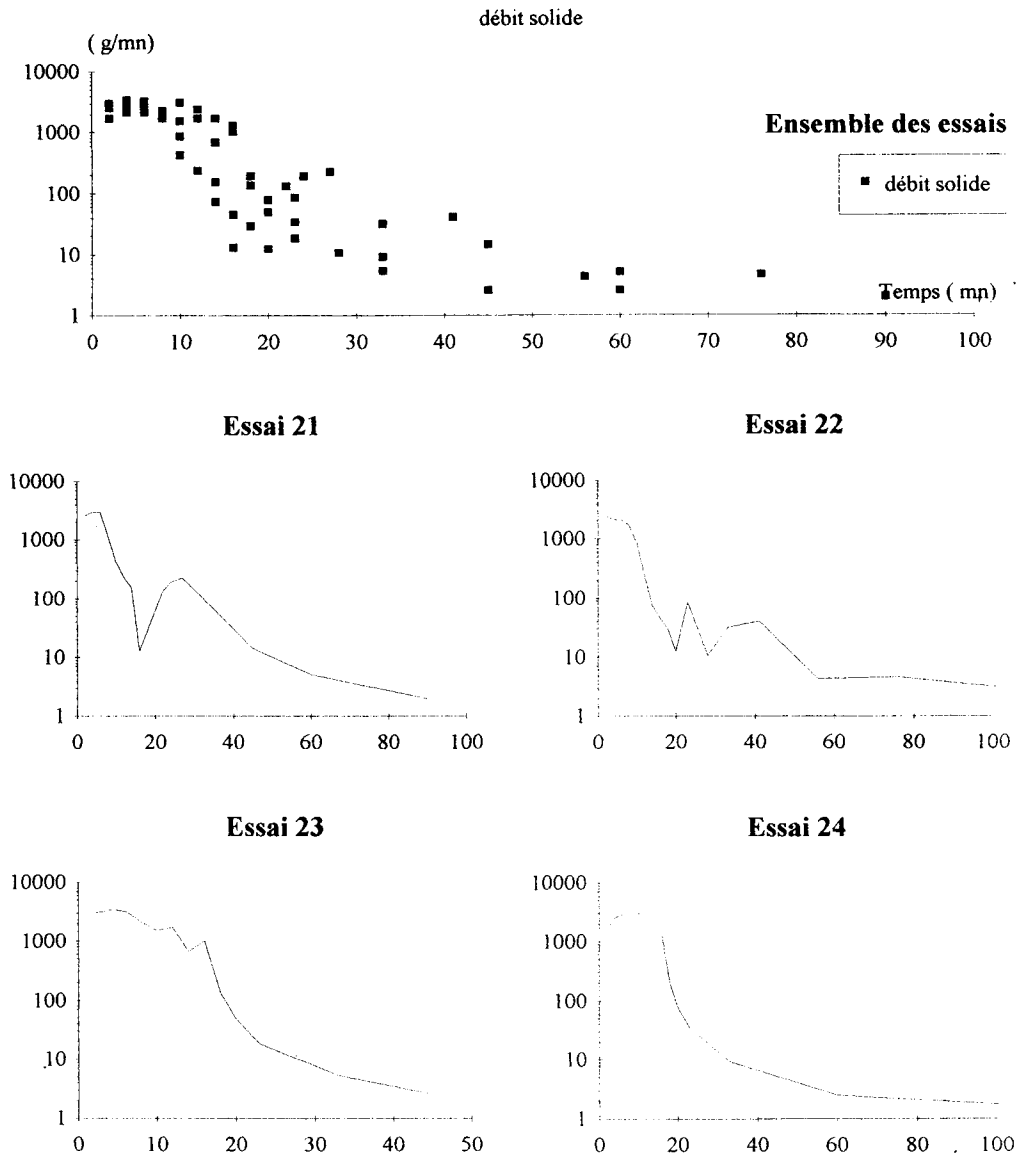


Figure 5-5 : Evolution du débit solide (g/mn) en fonction du temps pour chacun des essais.

5.3. Observations expérimentales des essais de formation du lit

5.3.1. Approche globale

La figure 5-5 montre l'évolution du débit solide durant les essais. Il apparaît que tous les essais présentent la même évolution. Cependant, la dispersion est considérable et le débit solide - sur un pas de temps de 2 mn - peut varier dans un rapport de 1 à 10. Ainsi, l'évolution en fonction du temps n'est plus monotone comme dans le cas des essais en canal étroit.

La figure 5-6 montre que le d_{90} subit lui aussi une forte dispersion. Il apparaît donc que d'autres phénomènes que ceux rencontrés dans le canal étroit se produisent.

Dans la suite, comme précédemment, on découpe les essais en quatre phases en fonction du débit solide. Elles avaient été définies de la façon suivante :

- 1000 gr/mn < débit solide 1° phase
- 10 gr/mn < débit solide < 1000 gr/mn 2° phase
- débit solide < 10 gr/mn 3° phase
- dépavage 4° phase

5.3.2. Première phase

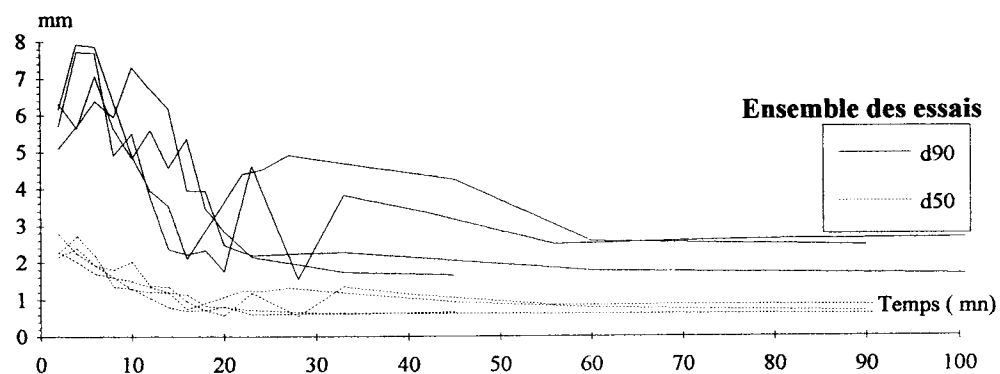
Si, comme pour les essais précédents, on isole les prélèvements qui correspondent à un débit solide de plus de 1000 g/mn, on remarque que les concentrations en matériaux sont nettement plus faibles que précédemment. En effet, la figure 5-7 correspond au

paramètre $\frac{Q_s}{QI^2}$ en rapport avec la formule de Meunier.

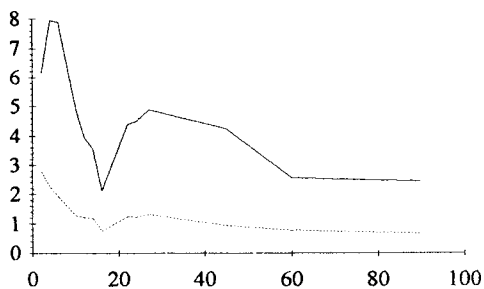
Le débit solide mesuré est - en moyenne - supérieur de 70% lorsque le lit ne peut divaguer⁶. Cette différence n'est pas négligeable mais reste de l'ordre des incertitudes relatives aux formules de transport solide actuelles.

⁶ Cet écart est de l'ordre de l'erreur de calage des formules de transport solide. Par exemple, LEFORT (1991), lors de l'établissement de sa formule - qui regroupe environ 300 mesures en mono- et en bi-dimensionnel - note que 90% des valeurs mesurées sont comprises entre la moitié et le double des valeurs calculées. L'écart noté dans le cadre de ces essais s'intègre donc parfaitement dans la fourchette d'incertitude.

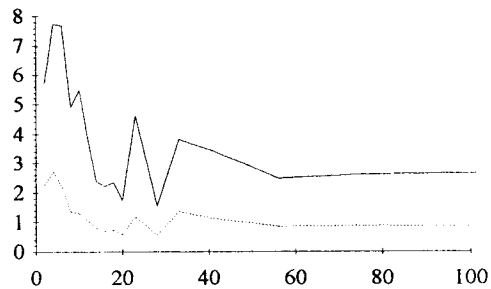
D90 et D50 (mm)



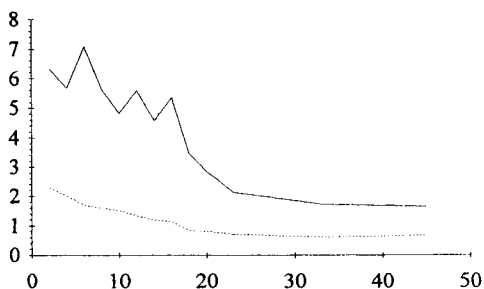
Essai 21



Essai 22



Essai 23



Essai 24

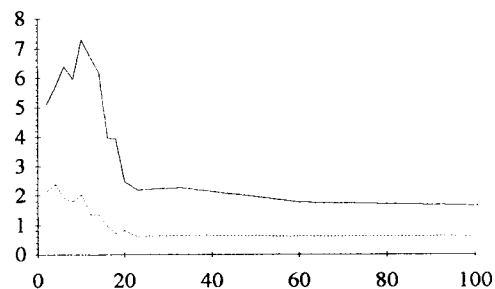


Figure 5-6 : Evolution du d_{90} et du d_{50} (mm) en fonction du temps pour chacun des essais.

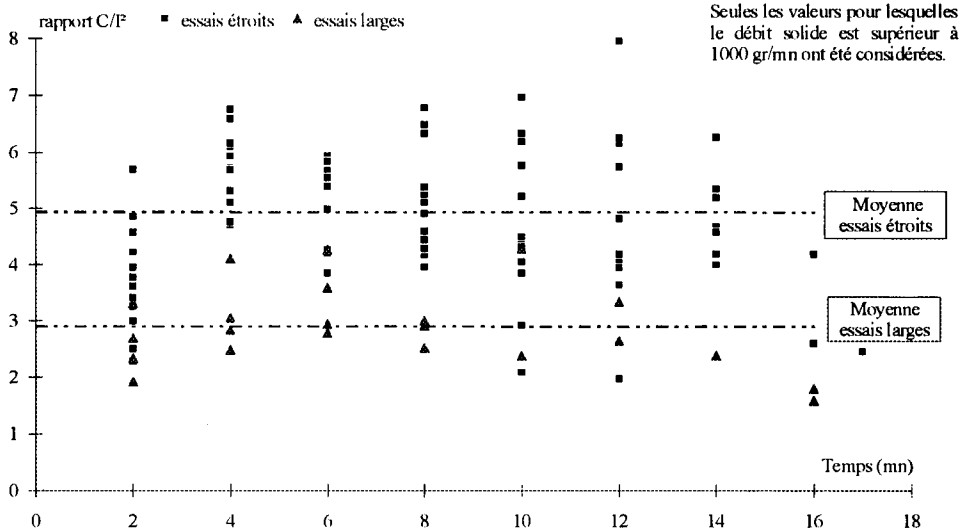


Figure 5-7 : Confrontation du débit solide mesuré en canal de 60 cm de largeur avec les mesures obtenues dans le cadre d'un écoulement monodimensionnel.

C'est surtout la granulométrie transportée qui distingue ces essais des précédents. En effet, la figure suivante compare les trois déciles les plus couramment employés aux valeurs de la granulométrie de base⁴⁾ des essais.

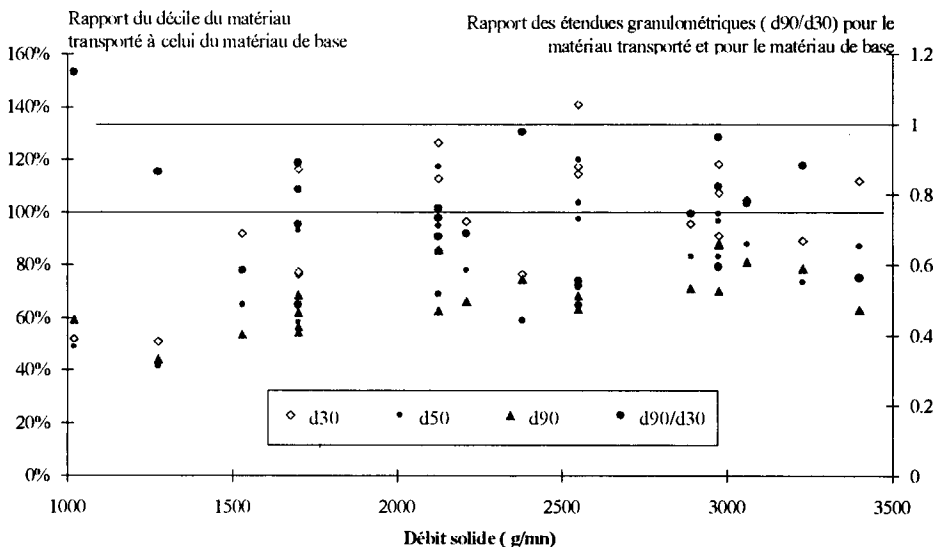


Figure 5-8 : Confrontation de la granulométrie transportée avec la granulométrie de base pour les débits solides supérieurs à 1000 g/mn.

Il apparaît nettement que, même dans la période de fort transport solide, il se produit un tri granulométrique important. En effet, le rapport $\frac{d_{90\text{transport}}}{d_{90\text{base}}}$ est ici d'environ 60 à

100 % alors qu'il atteint 120 à 140 % dans le cadre des essais en canal étroit durant la première phase (figure 4-39). Ce contraste indique un très net changement de comportement du lit.

On peut observer une très grande mobilité de l'écoulement, le lit mineur balayant l'ensemble de la surface disponible, restructurant fondamentalement la couche de surface.

Ainsi, le lit stocke les éléments fins et grossiers et laisse transiter préférentiellement les éléments moyens. Cette évolution est clairement traduite par les déciles (le d_{30} transporté est supérieur à celui du matériau de base alors que le d_{90} du transport est bien inférieur à celui du matériau initial. Le rapport d_{90}/d_{30} montre, lui aussi, le resserrement de la courbe en étant toujours inférieur à celui du matériau de base.

Pour mieux rendre compte du tri, on a calculé le rapport de la fraction de chaque classe granulométrique dans les matériaux transportés durant les 10 premières minutes par celle du matériau de base (un rapport supérieur à 1 témoigne d'une plus grande mobilité que l'ensemble des matériaux).

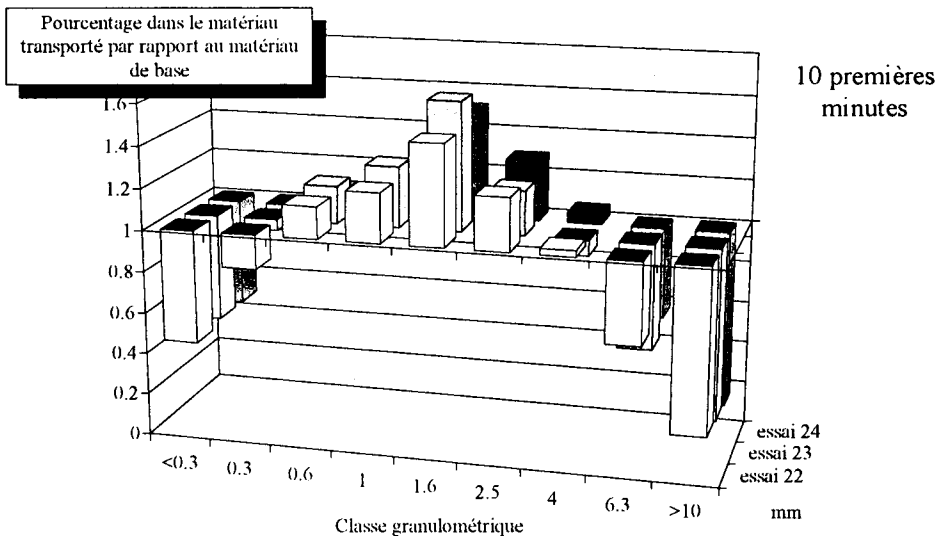


Figure 5-9 : Pourcentage relatif de chaque classe granulométrique dans les matériaux transportés durant les dix premières minutes par rapport à ceux du matériau de base.

Il apparaît très clairement que les éléments moyens bénéficient d'une mobilité très supérieure à celle des éléments fins ou grossiers.

Ainsi, bien qu'il ne soit pas possible de calculer la granulométrie du lit, il se produit un appauvrissement des classes granulométriques moyennes. D'autre part, l'observation du modèle montre que les dépôts présentent une faible étendue granulométrique, étant

composés soit d'éléments fins, soit d'éléments grossiers. Ils modifient ainsi largement la granulométrie transportée en aval du modèle.

Enfin, on a pu observer que le transport solide se fait par amas de matériaux de granulométrie resserrée⁷. Il faut cependant noter qu'il ne s'agit que d'un phénomène secondaire et peu marqué par rapport au tri par les dépôts de granulométrie resserrée.

Le mécanisme semble être le suivant :

- Lorsque l'écoulement dépose localement des **amas grossiers**, ceux-ci forment des zones de forte résistance par rapport à l'ensemble du lit. Ces zones facilitent alors l'arrêt d'autres éléments grossiers - car ils y trouvent appui. Cependant, l'écoulement est capable de transporter les éléments moyens et fins - en partie à cause de la pente accrue. On trouve alors dans le lit des zones de matériaux beaucoup plus grossiers que la couche de surface de l'ensemble du lit. Dans le cas d'un écoulement monodimensionnel, un groupe d'éléments grossiers ne pouvait s'arrêter dans le lit qu'au prix d'une forte rupture de pente. Ce phénomène était donc rare et limité, l'affouillement des zones en aval de la structure d'éléments grossiers, plus fines, finissant par la détruire.
- Lorsque le lit est localement composé d'**éléments fins**, l'écoulement est très rapide et est capable de déplacer les blocs. Dans ce cas, le lit tend naturellement à devenir encore plus fin, et lorsque l'écoulement se déplace, il laisse une zone appauvrie en éléments moyens ou gros.

Ces deux phénomènes sont directement liés à la bistabilité granulométrique **locale** du charriage hyperconcentré mise en lumière au chapitre 4 consacré aux essais en canal étroit. Ces particularités locales finissent par avoir une influence sur le comportement général du torrent en effectuant un resserrement de la granulométrie transportée.

⁷ La mesure de la granulométrie sortante n'est cependant pas capable de mettre en évidence ces fluctuations de granulométrie en fonction du temps, essentiellement parce que les durées des prélèvements sont très supérieures (au moins 2 mn) à celles correspondant aux fluctuations (quelques secondes). Cependant, l'observation visuelle du modèle montre que ces variations sont assez nettes.

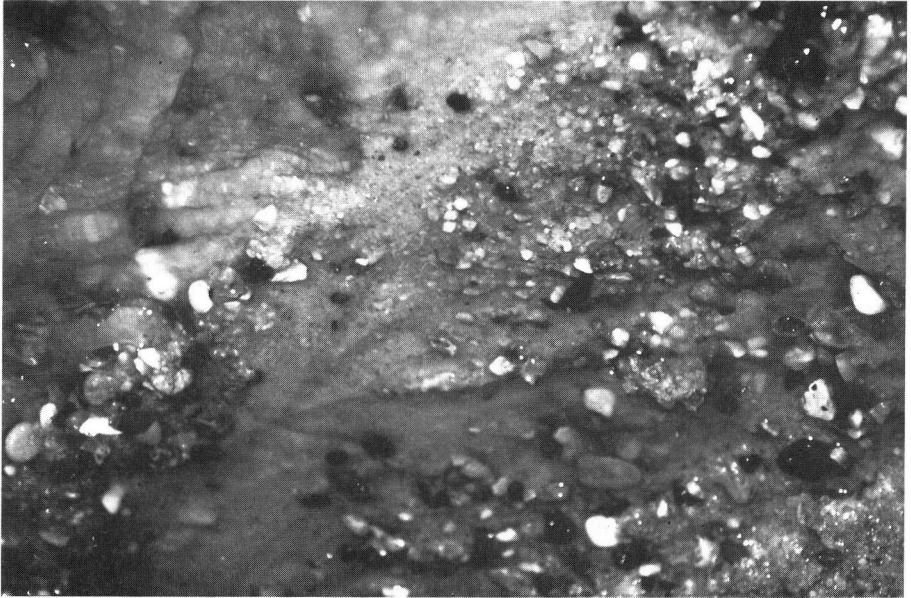


Figure 5-10 : Photographie d'une zone de ségrégation granulométrique durant l'essai 24.

Ces deux phénomènes composent l'essentiel de l'évolution morphologique du lit durant la phase de fort transport solide. Ainsi, le lit divague au gré de ces dépôts, le niveau du fond variant, sans raison extérieure, de quelques centimètres. Les dépôts grossiers et les zones recouvertes de fines forment généralement les deux aspects des dunes à forte pente évoquées par MIZUYAMA (1977) et qui seront abordées au chapitre suivant. Il semble en effet nécessaire que le modèle soit d'une certaine ampleur pour que de telles structures aient la place de se développer. Elles sont donc restées au stade embryonnaire dans ce modèle de faibles dimensions.

D'autre part, il est apparu un tri latéral des grains : les éléments grossiers sont poussés sur les bords de l'écoulement, limitant ainsi les divagations et contribuant - par "affinement" du lit - à favoriser le transport solide. Il apparaît donc qu'il se forme des bourrelets latéraux à proximité immédiate de l'écoulement.

A la fin de la première phase, la morphologie est particulièrement instable : le mouvement d'un seul grain, en détournant une partie du débit, peut causer un changement de bras.

Cependant, avec la diminution du débit, l'augmentation de la fraction grossière dans le lit et l'enfoncement du lit mineur, les divagations deviennent de plus en plus faibles et

de plus en plus rares. On passe alors à la seconde phase des essais qui correspond à une restructuration du lit mineur.

Il ne faut cependant pas considérer que la surface du lit est figée durant la seconde phase. C'est seulement le nombre de bras, leur tracé, les zones de confluence-diffuence qui sont figées. Ensuite, les distributions de débits dans les bras varient, les zones d'écoulement préférentiel sont déplacées etc....

5.3.3. Deuxième phase

Il s'agit des mesures pour lesquelles le débit solide est compris entre 10 et 1000 g/mn (figure 5-5). C'est dans cette phase que le lit se fixe peu à peu. Les modifications du dessin en plan ne sont plus que des retouches et sont toujours très lentes. La variabilité des débits solides correspond à celle des changements de morphologie, plus par apport de matériaux facilement mobilisables que par modification des conditions hydrauliques.

Il apparaît que la décroissance du débit solide en fonction du temps est à la fois plus lente et beaucoup plus irrégulière que pour les essais en canal étroit. Cette différence peut s'expliquer par un temps de réponse nettement supérieur dans le cas d'un lit large et ce pour deux raisons :

- en divaguant, le lit met en jeu de plus grandes quantités de matériaux. Il faut donc un temps plus long pour les transporter et les trier.
- D'autre part, les conditions hydrauliques sont moins vigoureuses - à cause d'une largeur d'écoulement plus importante - et la restructuration du lit est alors beaucoup plus difficile.

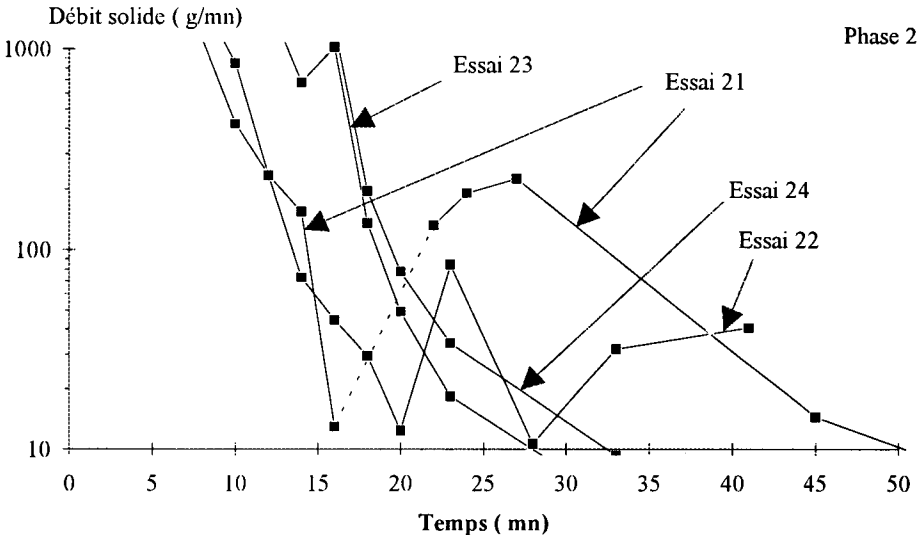


Figure 5-11 : Evolution du débit solide durant la deuxième phase des essais.

Il faut noter que durant l'essai 21 le débit liquide a été arrêté pour réaliser des mesures de la granulométrie du lit après les 20 premières minutes correspondant à l'injection

des matériaux. Le passage brutal à un débit de 0.4 l/s entraîne une augmentation artificielle du débit solide qui se prolonge assez longtemps. Ainsi, le passage du débit solide de 13 à 132 g/mn entre 16 et 22 mn après le début de l'essai correspond à cette coupure de l'écoulement.

D'autre part, pour l'essai 22, les fluctuations de débit solide sont importantes. Or, la durée du phénomène (augmentation puis diminution du débit solide) montre qu'un tel écart présente une réalité physique et n'est pas causé par une erreur de mesure.

Comme pour les autres essais, les variations durant cet essai correspondent à des modifications de la morphologie même si, durant cette phase, le dessin du lit n'est pas modifié dans ces grandes lignes. La faiblesse du débit liquide (0.3 l/s) - très proche du seuil de début de mouvement - explique que le transport solide soit sensible à la moindre variation de morphologie.

Pour l'ensemble des essais, l'équilibre des débits entre les différents bras n'est pas encore bien établi et certaines zones sont encore largement modifiées. En effet, par opposition aux essais monodimensionnels, de nombreuses parties du lit mineur sont soumises à des écoulements très peu vigoureux. Une légère variation dans la configuration du lit se traduit par une variation des contraintes sur un lit fragile. Il se produit alors des déstabilisations de grande ampleur entraînant une augmentation importante du débit solide.

Comme le montre la description du phénomène de pavage au chapitre précédent, la mobilité des grains dépend de caractéristiques globales du lit. Ainsi, une zone déstabilisée facilite l'arrachement d'autres grains en aval et le phénomène s'amplifie, en volume ou en durée. Les sautes de débit solide durent donc plusieurs minutes, contrairement aux fluctuations que l'on pouvait observer dans le cas du canal étroit.

Cependant, il existe une tendance concernant l'ensemble du lit. En effet, l'étude de la granulométrie sortante montre que la taille des grains transportés diminue assez régulièrement lorsque le débit solide décroît. Ainsi, la figure suivante montre l'évolution des trois déciles les plus couramment employés en fonction du débit solide⁸. Ils sont adimensionnalisés par les déciles de la granulométrie de base. On a alors :

$$d_{i*} = \frac{d_i \text{ matériau transporté}}{d_i \text{ matériau de base}} \dots\dots\dots (5-1)$$

⁸ L'évolution au cours du temps est irrégulière, mais il se dégage une tendance assez marquée.

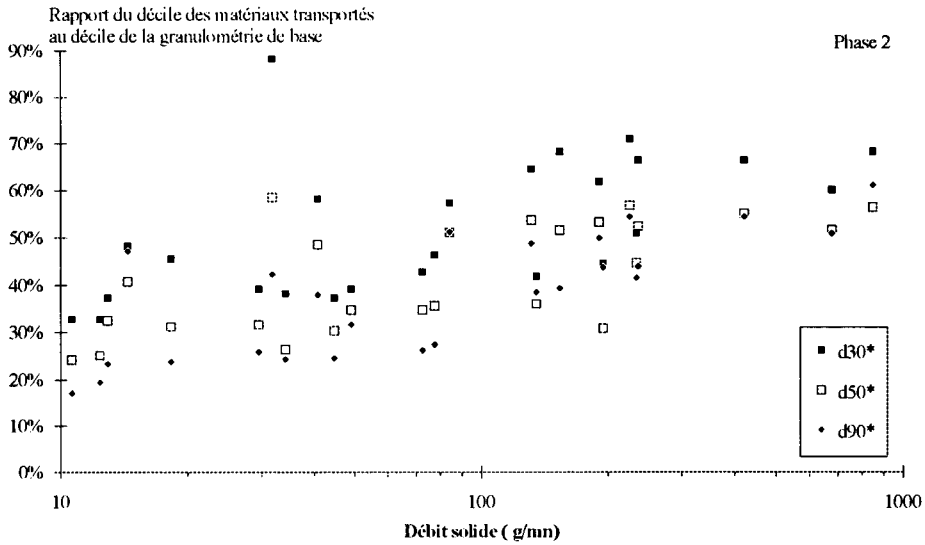


Figure 5-12 : Evolution de la granulométrie transportée par rapport à la granulométrie de base.

On remarque que les grains transportés sont 2 à 5 fois plus fins que la granulométrie de base. On obtient alors un résultat assez semblable à celui correspondant aux essais en canal étroit (figure 4-48). D'autre part, la diminution de taille est d'autant plus forte qu'elle correspond à un décile plus grossier. On assiste donc, là encore, à un resserrement de la granulométrie comme le montre la figure suivante.

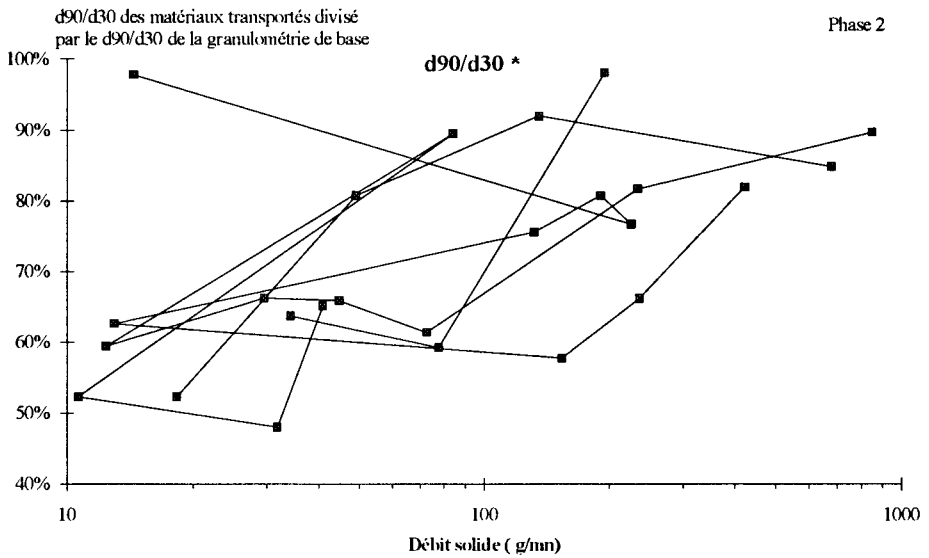


Figure 5-13 : Evolution de l'étendue granulométrique en fonction du débit solide.

Comme pour l'étape précédente, on a tracé pour chaque classe le rapport de la fraction dans le matériau transporté à celle dans le matériau de base.

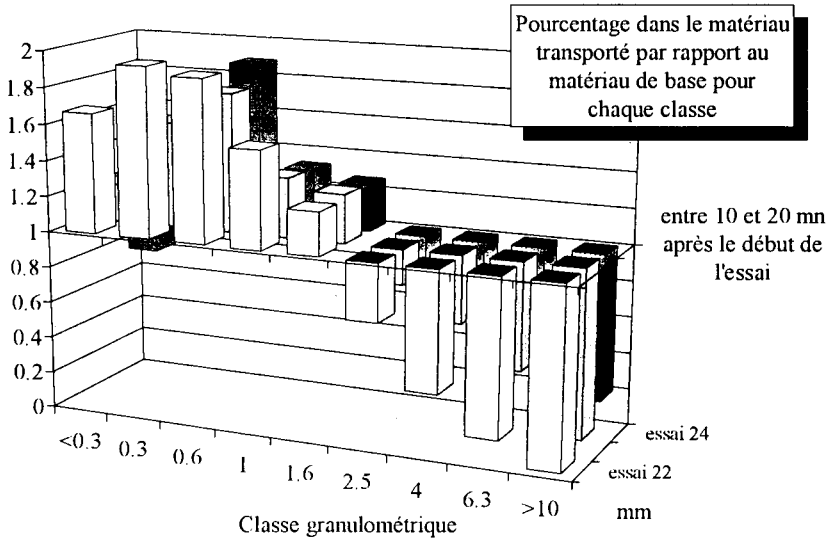


Figure 5-14 : Pourcentage relatif de chaque classe granulométrique dans les matériaux transportés entre 10 et 20 minutes après le début de l'essai par rapport à ceux du matériau de base.

Le tri est très différent de celui de la phase précédente et l'on se trouve dans une situation où le tri granulométrique est plus classique : les éléments sont d'autant plus

facilement transporté qu'ils sont fins. Cette caractéristique du charriage ordinaire traduit bien l'évolution par rapport à la première phase des essais.

5.3.4. Troisième phase

La dernière phase de l'essai de pavage est très similaire à celle rencontrée dans le cas des essais étroits. En effet, le lit est totalement figé. Le seul phénomène persistant est le lessivage des éléments fins cachés derrière les blocs. Or il n'est apparu aucune différence avec les essais en canal étroit, ni en observant les phénomènes, ni par le biais des mesures réalisées.

La mesure de la granulométrie du lit mineur a été réalisée comme dans les cas précédents. S'y ajoute cependant un caractère arbitraire lié au choix du site de mesure dans le lit mineur. La figure suivante montre le résultat de ces mesures. Une fois de plus l'essai 21, issu de conditions de formation très différentes, est isolé.

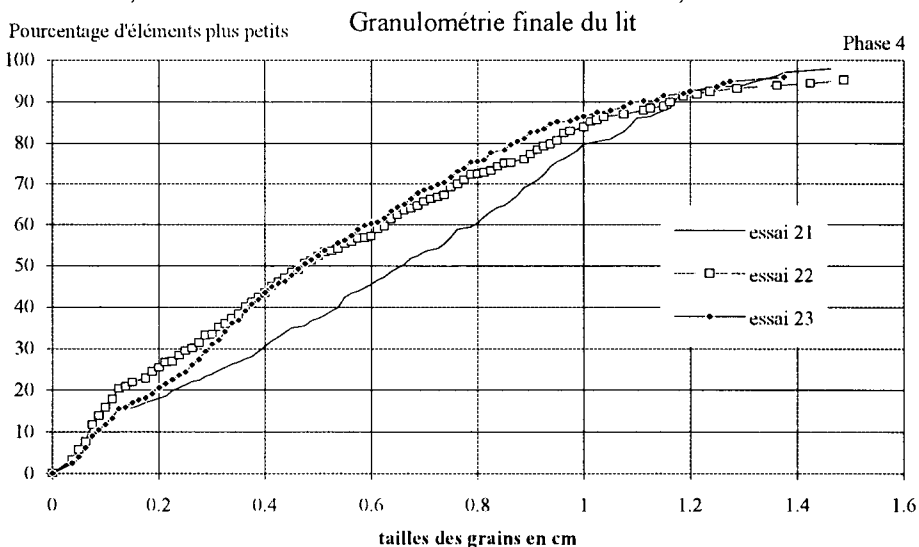


Figure 5-15 : Granulométrie du lit mineur à la fin des essais 21, 22 & 23.

Il apparaît, en comparaison avec la figure 4-58, que la répartition granulométrique du lit est moins uniforme que pour les essais en canal étroit. Des conditions hydrauliques moins vigoureuses ne permettent pas de trouver une répartition granulométrique aussi caractéristique que dans le cadre des essais en canal étroit.

Ainsi, la courbe granulométrique semble plutôt traduire la présence de différentes zones morphologiques.

La faiblesse des variations de pente ainsi que la granulométrie du lit (voir figure suivante) montrent que les essais en canal large sont proches de ceux réalisés avec un canal étroit et un débit nominal de 0.2 l/s. Or, ce débit correspond au début de

méandrage pour un canal de 10 cm de large. Le débit nominal rapporté à la largeur du lit principal⁹ est très proche des valeurs des essais en canal étroit pour un débit nominal de 0.2 l/s (le débit unitaire est alors de 0.02 l/s /cm). On obtient en effet les valeurs suivantes :

numéro d'essai	débit liquide total
	largeur moyenne du lit principal (l/s / cm)
22	0.01986
23	0.01988
24	0.021

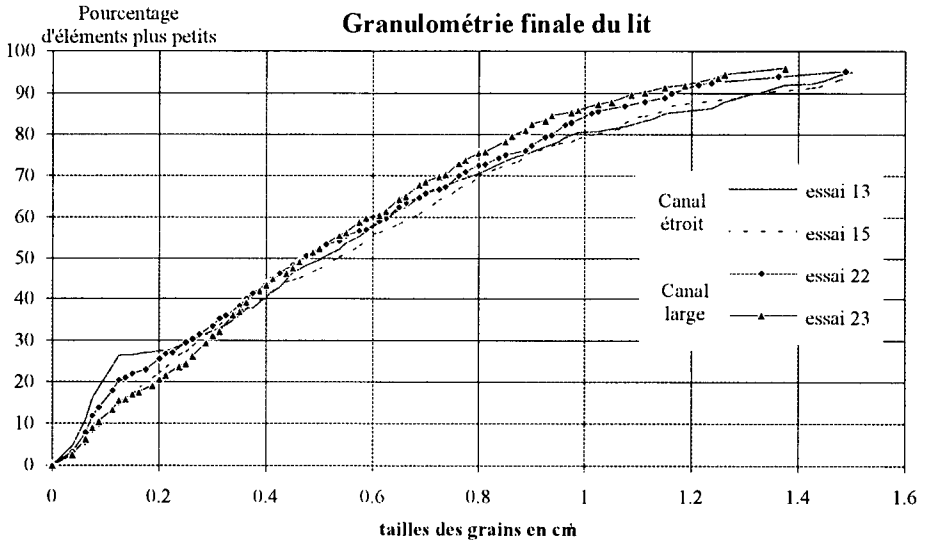


Figure 5-16 : Granulométrie finale pour les essais en canal étroit de débit nominal 0.2 l/s et pour les essais en canal large.

Ainsi, pour cette pente et cette granulométrie¹⁰, il apparaît une continuité entre cette série d'essais et ceux réalisés avec un canal étroit avec un débit nominal de 0,2 l/s. Cependant, en absence de divagations, il n'y avait aucune place pour les dépôts sélectifs. Cette différence explique que le tri granulométrique global - en particulier pour le lit majeur qui est très appauvri en éléments moyens - et la morphologie - voir le paragraphe suivant - soient très différents.

⁹ On a vu au chapitre 3 que cette valeur moyenne n'a qu'une signification d'ensemble par rapport à l'ensemble du lit et qu'elle cache de très fortes disparités en fonction du dessin en plan du lit.

¹⁰ Les caractéristiques de ces essais sont les suivantes :

Numéro d'essai	13	15	22	23
débit liquide nominal (l/s)	0.2	0.2	0.3	0.35
Pente finale (%)	10.8	12.2	10.6	10.4

5.4. Structures morphologiques élémentaires d'un lit pavé

5.4.1. Introduction

Il s'agit ici de décrire les principales structures morphologiques que l'on rencontre sur le modèle après pavage du lit. La morphologie de la période de fort transport solide a été sommairement exposée au paragraphe 5-3. Pour une confrontation modèle réduit - terrain, elle présente un intérêt réduit dans la mesure où l'on ne peut l'observer qu'exceptionnellement dans la nature.

Au contraire, la morphologie du lit sans transport solide correspond à celle que l'on peut examiner au quotidien dans la nature. Sa description est donc plus détaillée. Cependant, ces expériences ne sont que très sommaires par rapport à la complexité naturelle et il ne s'agit ici que de détailler les structures morphologiques élémentaires.

Les différentes échelles de phénomènes seront abordés dans le chapitre suivant où le modèle sera assez complet pour les mettre en lumière.

Dans tous les cas, le lit prend une forme différente pour chaque essai. Cependant, il est remarquable que la morphologie reste invariante dans ses grandes lignes. La photo ci dessous montre le lit à l'équilibre dans le cas de l'essai 25.

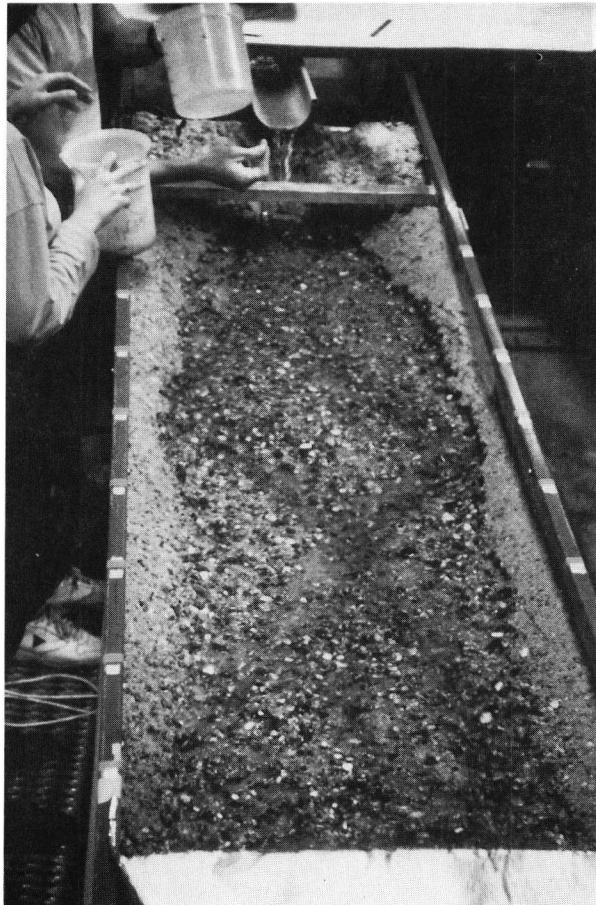


Figure 5-17 : Vue d'ensemble du lit en fin de pavage lors de l'essai 25.

Il apparaît des tresses¹¹ de longueur assez constante (d'environ 80 cm à 1 m). Aucune différence n'est apparue entre les essais avec et sans recyclage. La description suivante distingue les différents types de structure.

Cependant, cette démarche, présente une réelle difficulté car les interactions entre les différents éléments du lit sont capitales pour en comprendre le fonctionnement. Les structures sont détaillées suivant une taille décroissante comme le montre le tableau ci dessous :

structure	échelle de la structure
Lit en tresse	Ensemble du canal
Replat - rapide	Bras d'une tresse
Seuil - mouille	Structure élémentaire

5.4.2. Bras multiples et méandres

Le dessin ci dessous correspond à une schématisation sommaire de dessin en plan du canal.

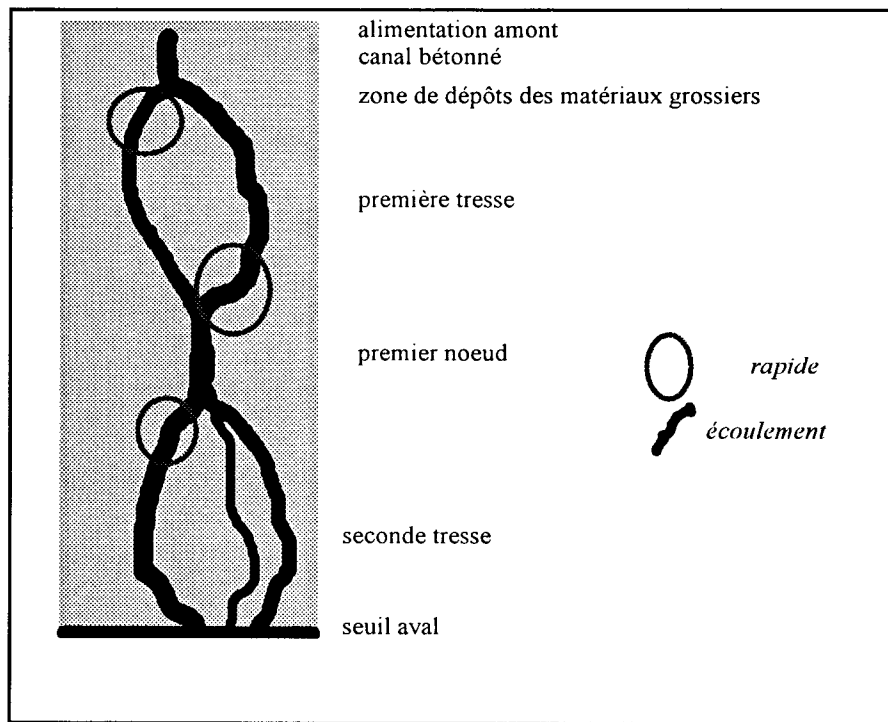


Figure 5-18 : Schématisation de l'écoulement dans le chenal.

¹¹ On désigne par tresse un ensemble de bras et d'îles situés entre deux noeuds. En effet, on n'a jamais observé au cours de ces essais de structure en tresse très compliquée : le lit est resté divisé en seulement 2 ou 3 bras. Il a donc été possible d'individualiser chaque dessin entre des noeuds de convergence de l'écoulement.

Le lit, unique au niveau de l'arrivée en matériaux, se sépare presque immédiatement en deux ou trois bras. En effet, dans les 30 à 40 cm supérieurs, la granulométrie est importante, la structuration du lit très nette et la distribution du débit liquide entre les bras n'est pas modifiée par une érosion ou un dépôt local. Il s'agit d'une zone à forte pente par rapport à l'ensemble du lit¹².

C'est essentiellement cette structure qui provoque la séparation des lits en amont du modèle. Ensuite, la différence de niveau suivant un même transect transversal entre deux lits est généralement importante (plusieurs cm). La figure suivante schématise le profil longitudinal d'une tresse :

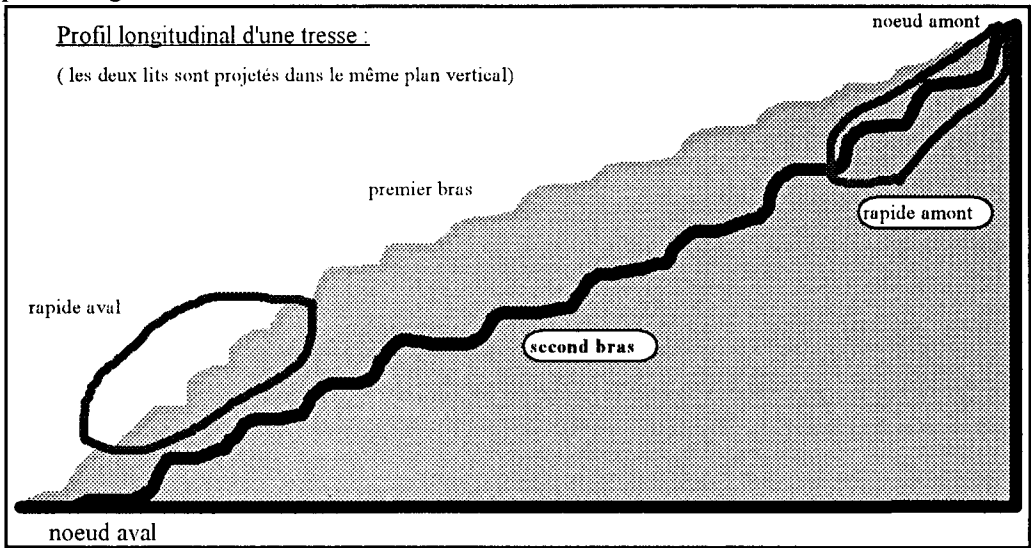


Figure 5-19 : profil en long schématique d'une tresse.

Plus bas, les deux - ou trois - lits se rapprochent et finissent par se rejoindre environ 80 cm en aval du sommet du canal¹³ finissant ainsi le premier ensemble de bras multiples. Cette réunion se réalise souvent au prix d'une rupture de pente du bief qui était le plus haut. Il semble donc que la séparation en plusieurs canaux se traduit par la succession d'un rapide¹⁴ et d'un lit à pente relativement réduite.

Cette situation conforte la définition retenue pour les *rapides* (*Riffles* dans la littérature anglo-saxonne) : il s'agit d'une structure liée à la dynamique du cours d'eau

¹² Ce "cône de dépôt" en aval de la zone de fourniture en matériau montre que les problèmes de conditions aux limites sont plus importants dans le cadre d'un modèle large. En effet, l'écoulement bénéficie de plus de liberté pour rejeter des matériaux qui ne correspondent pas aux conditions hydrauliques.

C'est ce qui se passe dans la partie amont où la granulométrie des matériaux injectés est probablement trop importante. Cependant, cette structure n'occupe qu'une trentaine de centimètres en amont du modèle. Elle n'a donc qu'un rôle réduit. En effet, la séparation en deux ou trois bras se reproduit immédiatement en aval du premier noeud, sans aucune influence des conditions aux limites.

¹³ Il s'agit d'une valeur peu variable d'un essai à l'autre. Il est cependant difficile de déterminer l'influence de la largeur du canal. En effet, s'il ne fait aucun doute que l'écoulement a la possibilité de divaguer, les dimensions des tresses sont probablement liées à la largeur du modèle.

¹⁴ Le terme de rapide correspond à un rapprochement de seuils qui entraîne une augmentation locale de la pente. Cette notion doit être complétée par l'idée qu'il s'agit d'une structure **intrinsèquement** créée par l'écoulement. Elle n'a donc aucun rapport avec les rapides engendrés par la confluence d'une rivière et d'un torrent.

et non pas à une influence extérieure. Cependant, il n'est pas possible d'expliquer la formation de ces structures autrement que par les théories minimisant une fonction (comme celle du minimum de Puissance Unitaire d'Écoulement exposée au paragraphe 2.7.3).

Le rapide était placé soit après la séparation des deux courants, soit avant leur confluence mais jamais au milieu d'un des bras. Il semble qu'il y a une préférence pour un rapide en amont d'un des biefs secondaires lorsqu'il y a un coude à sa naissance alors que le rapide avant la confluence ne se produit que dans le bief le plus rectiligne, pour "rattraper" la dénivelée de l'autre bras.

Dans l'ensemble, la pente d'une tresse semble supérieure à celle de l'ensemble du lit.

Il semble que c'est l'arrêt des mouvements du lit (par réduction du débit liquide, du débit solide et augmentation sensible des grains de l'ensemble de la surface du lit mineur) qui détermine la configuration finale plutôt que des caractéristiques particulières de la géométrie du fond. Ainsi, le dessin en plan est particulièrement fragile, la moindre modification des contraintes sur le lit pouvant conduire à de nouvelles divagations.

5.4.3. Largeur du lit mineur

A la fin des essais 22, 23 & 24, les largeurs au miroir du lit principal d'une part et des écoulements secondaires d'autre part, ont été relevées. Il est ainsi possible de calculer la largeur moyenne finale de l'écoulement comme le montre le tableau ci dessous :

numéro d'essai	22	23	24
largeur <i>moyenne</i> du lit principal (cm)	15.1	17.6	18.75
largeur <i>moyenne</i> de l'ensemble des lits mineurs (cm)	24.8	24.5	24.8
débit liquide nominal (l/s)	0.3	0.35	0.4

La distinction apparaît clairement entre deux grandeurs :

- la **largeur totale de l'écoulement** (somme des largeurs de toutes les sections mouillées) est très peu variable pour les trois essais alors que les débits nominaux passent de 0.3 à 0.4 l/s. Ainsi, il semble que ce paramètre est plutôt lié aux divagations initiales (c'est à dire avec un débit liquide de 0.5 l/s). En effet, c'est dans les 10 premières minutes que le lit majeur est formé. Or il semble que le balayage de l'ensemble du lit par un écoulement alternant érosion et dépôt laisse toujours la même largeur disponible pour le débit de l'ordre de celui qui a formé le lit.
- Au contraire, la **largeur du lit "principal"** est variable d'un essai à l'autre. Mais le débit unitaire calculé à partir de la seule largeur moyenne du lit principal $\left(\frac{\text{débit liquide total}}{\text{largeur moyenne du lit principal}} \right)$ est constant pour les trois essais et égal aux valeurs correspondant à un débit de 0.2 l/s pour un canal de 10 cm de large (0.02 l/s / cm).

Ainsi, il semble que le dessin du lit évolue de la façon suivante :

- un lit principal dans lequel se produit l'essentiel du débit solide et qui draine toujours la même fraction du débit liquide total. Le débit unitaire est peu variable (nombre de Froude proche de l'unité).
- Un lit secondaire qui draine de faibles débits mais qui occupe le lit moyen non utilisé par l'écoulement principal.

Pendant, ces explications sont très schématiques par rapport à la complexité de la réalité, la distinction entre lit principal et lits secondaires étant souvent arbitraire.

5.4.4. Alternance seuil - mouille

Les structures seuils-mouilles constituent le maillon élémentaire des lits pavés¹⁵. C'est leur succession qui forme les marches d'escalier^{el}. Elles sont alors plus ou moins nombreuses ou plus ou moins développées suivant la structure qu'elles composent.

Ainsi, un rapide se présentera comme une succession rapprochée de seuils et de mouilles bien formés alors que la perception de ces éléments dans une zone de moindre pente est beaucoup plus subjective.

Lorsque l'écoulement divague, les seuils sont plus mal "construits" que dans le cas des écoulements monodimensionnels. Cette différence s'explique d'une part par la moindre contrainte de cisaillement au cours de ces essais (il n'est plus nécessaire d'avoir une aussi bonne structuration des éléments pour résister à l'écoulement) mais aussi - et surtout - par le caractère tridimensionnel des structures. En effet, il est beaucoup plus difficile de réaliser un seuil barrant tout l'écoulement dans un lit large que lorsque le canal n'a que 10 cm de largeur.

Ainsi, les seuils présentent une juxtaposition parfois incomplète de blocs qui ralentissent l'écoulement et forment une rupture de la pente de la ligne d'énergie.

5.5. Phase de dépavage du lit

L'essai de dépavage est destiné à quantifier la résistance du lit à l'érosion. Comme précédemment, un débit linéairement croissant est appliqué jusqu'à mise en mouvement du lit. La figure suivante montre les débits liquide et solide mesurés durant les quatre premiers essais en fonction du temps.

Il apparaît qu'à l'exception de l'essai 22, la mise en mouvement des matériaux est très régulière et presque identique pour tous les essais. Cette constatation renforce l'idée déjà émise durant l'analyse de la phase 2 : Le débit de 0.3 l/s semble trop faible pour constituer réellement un pavage.

Ainsi, l'application du même débit liquide entraîne un débit solide beaucoup plus important pour l'essai 22. Le pavage étant très lent lorsque l'écoulement a la possibilité de divaguer, il est possible qu'une structuration du lit se produise beaucoup plus

¹⁵ La structure seuil - mouille est absente des lits en cours de formation. WHITTAKER (1987) - entre autres - avait déjà exprimé cette constatation en considérant que la fourniture excessive à long terme de sédiments est nuisible à la formation de marches d'escalier.

lentement pour un si faible débit (l'essai a cependant duré 160 mn et aucun signe d'évolution n'est apparu durant la dernière heure).

La comparaison avec la figure 4-62 montre que le phénomène est beaucoup plus régulier que pour un canal étroit.

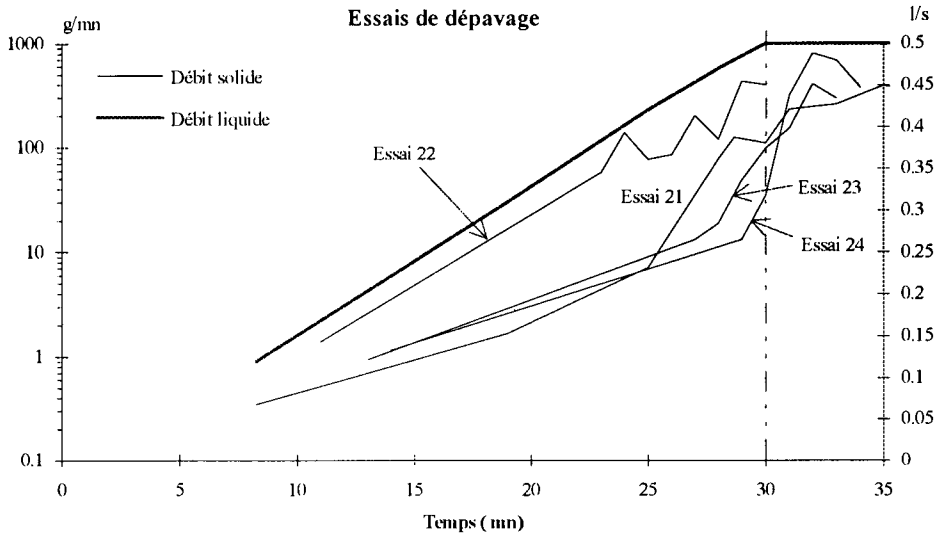


Figure 5-20 : Débits liquide et solide en fonction du temps.

L'observation montre que, pour un écoulement sans restriction de largeur, le dépavage se produit plutôt par changement de lit et érosion d'une zone moins préparée à l'écoulement. Il semble que les mouvements latéraux permettent de s'adapter aux variations de débit. Ainsi, le dépavage n'a plus du tout la même réalité que dans le cadre des essais monodimensionnels : il ne s'agit plus de l'arrachement des grains du fond, mais d'un prélèvement latéral.

La figure suivante montre les trois déciles des matériaux transportés les plus courants adimensionnalisés par les déciles de la granulométrie de base. Comme dans le canal étroit, il apparaît deux phases distinctes :

1. Dans un premier temps, le lessivage des fines commencé durant la troisième phase se poursuit. Il n'y a alors pas de différence avec les essais monodimensionnels.
2. Ensuite, il se produit une érosion de la surface du lit qui se traduit par une nette augmentation de la granulométrie transportée. Cependant, l'arrachement se situe en dehors de la zone de fort débit durant le pavage. C'est la différence essentielle avec les essais précédents. Cette distinction montre que l'écoulement a su construire un lit mineur pavé et résistant privilégiant l'érosion dans le lit moyen. Cependant, si l'on poursuit l'essai plus longtemps (essai 21), l'érosion s'étend à l'ensemble du lit

mineur, d'une part à cause d'une érosion *latérale*¹⁶ qui disloque peu à peu le lit et d'autre part à cause de la reprise des divagations.

Ainsi, le dépavage diffère suivant que la largeur est libre ou non. Cependant, il est probable que les mêmes mécanismes de base se produisent, mais le lit divaguant, il bénéficie de possibilités supplémentaires pour s'adapter aux contraintes de l'écoulement, le résultat étant nettement différent.

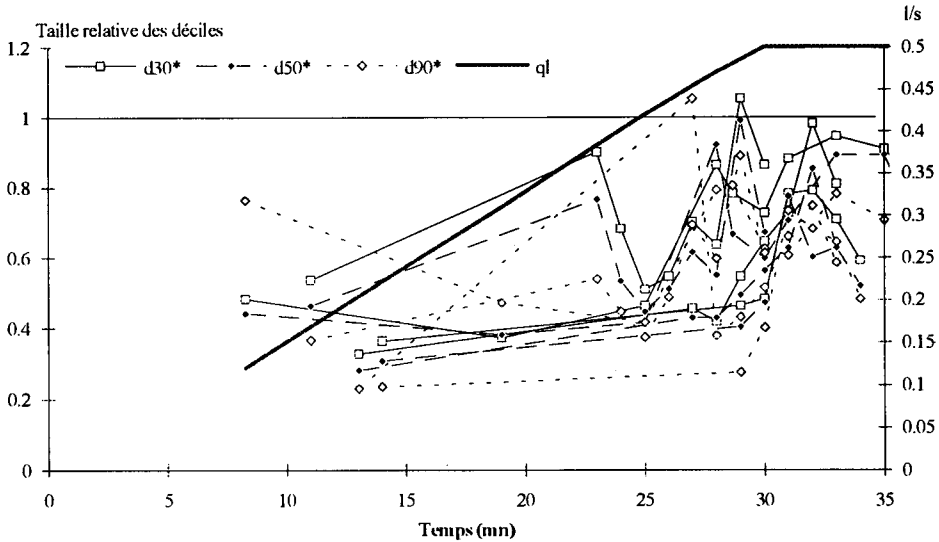


Figure 5-21 : Déciles de la granulométrie transportée et débit liquide en fonction du temps pour les essais de dépavage.

Ensuite le transport solide s'établit et on retrouve les mêmes phénomènes que durant la première phase des essais.

L'étude des conditions hydrauliques de dépavage en fonction des mêmes critères qu'au chapitre 4¹⁷ a abouti à la figure page suivante. Il apparaît, là encore, que le débit de début de mouvement est augmenté lorsque le débit liquide de formation est plus grand. Là encore, l'essai 21 peut être écarté, les conditions d'obtention du lit n'étant pas comparables à celles des autres essais¹⁸.

¹⁶ Il s'agit d'un phénomène purement tridimensionnel : les zones peu résistantes à l'érosion sont mises en mouvement. Leur départ prive d'appui ceux qui sont directement voisins. D'autre part, le déplacement ébranle la structure du lit fixe. Ainsi, l'érosion se propage lentement de façon latérale et gagne peu à peu l'ensemble du lit mineur.

¹⁷ Plusieurs seuils de débit solide ont été retenus, soit sur l'ensemble des matériaux, soit sur la classe granulométrique la plus grossière :

- débit solide total supérieur à 10 g/mn,
- débit solide total supérieur à 50 g/mn,
- transport des éléments de plus de 1 cm de diamètre ($q_{s100} > 0.1$ g/mn).

¹⁸ Cet écart montre combien il est difficile de tirer des relations générales de ce type d'essai. Ainsi, l'historique des écoulements - si difficile à quantifier - joue un rôle considérable dans ce type de résultat. Les valeurs obtenues ne doivent être considérées que les unes par rapport aux autres, uniquement pour réaliser des comparaisons.

Or, contrairement aux essais en canal étroit, la pente du lit est peu variable. La prise en considération de la contrainte de cisaillement n'aboutirait probablement pas à un résultat contraire comme dans le cas des essais en canal étroit.

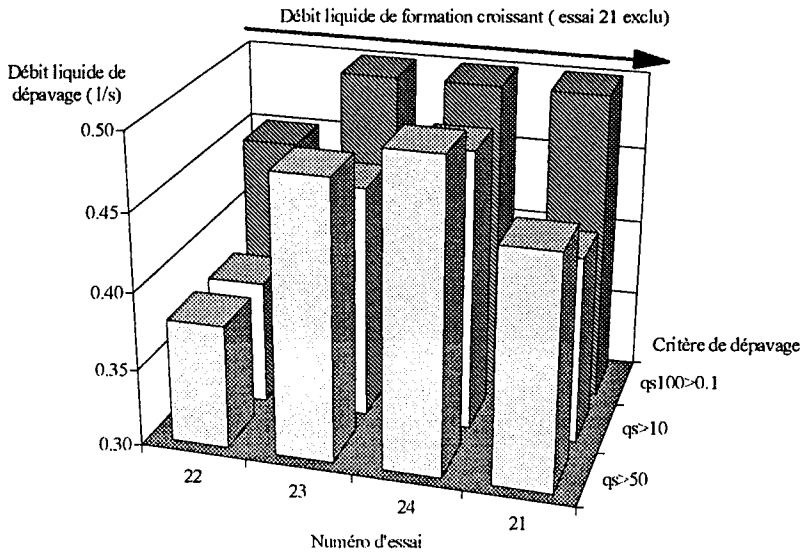


Figure 5-22 : Evolution du débit liquide de dépavage suivant les essais et les critères retenus.

Ainsi, il semble que le débit de dépavage est d'autant plus élevé que le débit formateur est grand.

On retrouve dans ces essais la notion de débit de plein bord utilisée par les géomorphologues. En effet, il apparaît que le lit ne commence à changer que lorsque le lit principal écoule un débit suffisant pour qu'une partie de l'écoulement passe dans des bras secondaires. Il semble donc que le débit de plein bord correspond à la limite de stabilité dans un tel cas.

Il faut noter qu'il s'agit alors - presque - uniquement d'une érosion latérale et non pas d'un approfondissement du lit.

5.6. Essais de formation du pavage avec recyclage

Seuls deux essais ont été conduits (25 & 26) à la suite l'un de l'autre. Le premier avec un débit liquide de 0.3 l/s alors que le second correspondait à un débit de 0.4 l/s. L'hydrogramme est tracé à la figure suivante. Les débits solides recyclés *connus* sont indiqués.

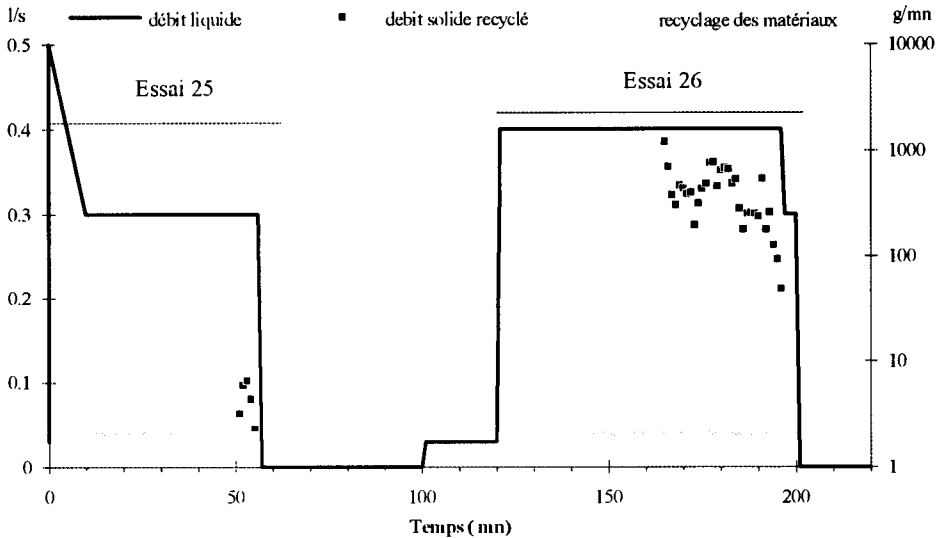


Figure 5-23 : Hydrogramme des essais avec recyclage.

Durant le recyclage, les matériaux sont prélevés pendant une minute et réintroduits durant la minute suivante.

Cependant, la taille des récipients utilisés pour le prélèvement étant trop réduite (2.5 l) les éléments les plus fins (moins de 0.2 à 0.3 mm) n'ont été que partiellement recyclés¹⁹. La perte en éléments fins a été estimée à partir d'une mesure de volume global dans la trémie en aval du modèle : 515 grammes ont échappé au recyclage en 49 minutes soit 10.4 g/mn. Il s'agit d'une valeur non négligeable par rapport au débit solide de l'écoulement (d'environ 100 g/mn en fin d'essai 26). Or l'influence de ce transport solide sur la dynamique du lit n'est pas connue.

D'autre part, il faut noter qu'il n'a pas été possible de réintroduire le matériau en amont sans entraîner des fluctuations de débit liquide. Or, il est certain que ces vagues ont favorisé le transport solide. Il est cependant difficile de savoir dans quelle mesure.

Les essais avec recyclage ont montré un comportement légèrement différent de celui des essais précédents. D'une part, comme il apparaît classiquement dans ce genre d'expériences, le transport solide persiste plus longtemps. Cependant, il diminue régulièrement. Mais il est difficile de savoir si cela est dû aux fuites des matériaux fins

¹⁹ Au contraire des prélèvements "définitifs" en bas de canal, il est nécessaire d'utiliser ici un récipient assez petit pour recycler les matériaux (le principal problème provient des éléments fins qui restent au fond du récipient au moment de la réintroduction dans l'écoulement).

ou si le lit parvient à offrir à chaque grain une zone abritée qui lui permet de ne pas être entraîné par l'écoulement.

D'autre part, le débit solide est très variable, en rapport avec les faibles ajustements morphologiques du lit. Il apparaît ainsi qu'il n'y a pas de relation univoque entre transport solide et conditions hydrauliques, les évolutions de l'ensemble du lit mineur (granulométrie, pente, conditions hydrauliques) étant négligeables dans ce cas.

Cependant, en lissant les variations de débit solide (par exemple avec une moyenne mobile sur 10 termes) on obtient une tendance régulière. C'est un tel lissage qui est réalisé lorsque le débit solide diminue et que les prélèvements durent plusieurs dizaines de mn. Ainsi, il n'y a aucune contradiction avec le fait que le débit solide durant les essais sans recyclage apparaisse plus régulier.

Enfin, les essais avec recyclage des matériaux n'ont pas mis en évidence de différence marquante par rapport à ceux conduits sans recyclage.

5.7. Conclusion

Ces essais ont montré que la possibilité de divagation s'accompagne de l'apparition de phénomènes spécifiques :

- Un débit solide plus faible que pour un écoulement monodimensionnel (même lorsque le débit liquide est très supérieur à la valeur critique).
- Un tri qui se traduit par un resserrement de la distribution granulométrique des grains transportés, les éléments les plus grossiers et les plus fins étant arrêtés par des structures morphologiques particulières. Ainsi, la zone de divagation épure la granulométrie.
- Des fluctuations du débit solide et de la granulométrie transportée liées aux changements de la morphologie. Le pas de temps caractéristique de ces changements est de quelques minutes avec le canal utilisé.
- D'autre part, ces essais ont montré différentes structures morphologiques qui composent un lit torrentiel. Il est possible de distinguer des tresses qui imposent le dessin général du lit, mais aussi des alternances de seuils et de mouilles qui forment les éléments de base de la constitution du lit. L'étude des débits unitaires a permis de distinguer :
 1. Un lit principal qui écoule l'essentiel du débit et dont la largeur au miroir est proportionnelle au débit total. En fin d'essai, ce lit est pavé par l'écoulement et résiste très bien à l'érosion.
 2. Un ou deux lits secondaires qui écoulent une faible fraction du débit et qui correspondent aux restes des évolutions morphologiques durant la phase de fort transport solide. Ils sont largement indépendants du débit de formation du pavage du lit et résistent très mal à une augmentation du débit liquide total. C'est par eux que commence le dépavage.

Cependant, une continuité avec les essais en canal étroit a pu être dégagée par l'intermédiaire des essais conduit avec un débit nominal de 0.2 l/s pour lesquels il apparaît un début de méandrage.

Finalement, la liberté de divagation permet l'apparition de nouveaux phénomènes. Les relations obtenues lors d'expériences monodimensionnelles ne sont donc que partiellement capables de traduire la réalité des phénomènes. Il est alors nécessaire de toujours corriger les valeurs fournies par des formules de transport solide (ou du moins de savoir dans quel sens se font les écarts) en fonction des phénomènes qui apparaissent en bidimensionnel.

Enfin, le resserrement de la granulométrie transportée dans une zone de divagation est un phénomène important car il semble que le débit solide est mieux adapté à la capacité de transport de l'écoulement après régulation sur une zone de dépôt.

Cependant, ces observations ne concernent que des essais extrêmement simplifiés en particulier à cause de la faiblesse de la surface offerte aux divagations. Il apparaît qu'avant de passer à la complexité des cas naturels, il est nécessaire d'observer l'effet d'un écoulement chargé sur une vaste zone. C'est l'objet du chapitre suivant.

5.8. Liste des figures

Figure 5-1 : Vue d'ensemble du canal avant l'essai 21.....	306
Figure 5-2 : Section transversale du canal avant et pendant essai.....	306
Figure 5-3 : Profil en long pour les quatre premiers essais.....	308
Figure 5-4 : Schéma de l'essai 21.....	310
Figure 5-5 : Evolution du débit solide (g/mn) en fonction du temps pour chacun des essais.....	312
Figure 5-6 : Evolution du d90 et du d50 (mm) en fonction du temps pour chacun des essais.....	314
Figure 5-7 : Confrontation du débit solide mesuré en canal de 60 cm de largeur avec les mesures obtenues dans le cadre d'un écoulement monodimensionnel.....	315
Figure 5-8 : Confrontation de la granulométrie transportée avec la granulométrie de base pour les débits solides supérieurs à 1000 g/mn.	315
Figure 5-9 : Pourcentage relatif de chaque classe granulométrique dans les matériaux transportés durant les dix premières minutes par rapport à ceux du matériau de base.....	316
Figure 5-10 : Photographie d'une zone de ségrégation granulométrique durant l'essai 24.....	318
Figure 5-11 : Evolution du débit solide durant la deuxième phase des essais.....	319
Figure 5-12 : Evolution de la granulométrie transportée par rapport à la granulométrie de base.....	321
Figure 5-13 : Evolution de l'étendue granulométrique en fonction du débit solide.....	322
Figure 5-14 : Pourcentage relatif de chaque classe granulométrique dans les matériaux transportés entre 10 et 20 minutes après le début de l'essai par rapport à ceux du matériau de base.....	322
Figure 5-15 : Granulométrie du lit mineur à la fin des essais 21, 22 & 23.....	323
Figure 5-16 : Granulométrie finale pour les essais en canal étroit de débit nominal 0.2 l/s et pour les essais en canal large.....	324
Figure 5-17 : Vue d'ensemble du lit en fin de pavage lors de l'essai 25.....	325
Figure 5-18 : Schématisation de l'écoulement dans le chenal.....	326
Figure 5-19 : profil en long schématique d'une tresse.....	327
Figure 5-20 : Débits liquide et solide en fonction du temps.....	330
Figure 5-21 : Déciles de la granulométrie transportée et débit liquide en fonction du temps pour les essais de dépavage.....	331
Figure 5-22 : Evolution du débit liquide de dépavage suivant les essais et les critères retenus.....	332
Figure 5-23 : Hydrogramme des essais avec recyclage.....	333

1 - Introduction - Généralités

2 - Analyse bibliographique

3 - Méthodes de mesure

4 - Effet local d'un écoulement d'eau claire
sur un lit de granulométrie étendue

5 - Passage
d'une modélisation monodimensionnelle
à une approche bidimensionnelle

**6 - Analyse des effets des variations temporelles
et de l'apport amont
de matériaux sur une zone de dépôt**

Sommaire

6.1. Objectifs	339
6.2. Mode opératoire	340
6.2.1. Modèle utilisé	340
6.2.2. Particularités du calage d'un modèle réduit en vue de l'étude de la morphologie	341
6.2.3. Paramètres mesurés.....	349
6.2.4. Particularités de chacun des essais	351
6.3. Observations expérimentales.....	354
6.3.1. Introduction	354
6.3.2. Préparation de la crue.....	354
6.3.3. Phase de fort transport solide	356
6.3.3.1. Déplacement des matériaux.....	356
6.3.3.2. Instabilité du transport solide	356
6.3.3.3. Dunes à forte pente	357
6.3.3.4. Bras multiples et dépôts latéraux.....	361
6.3.3.5. Structure à déplacement lent (onde à grande échelle)	363
6.3.4. Formation de la morphologie finale du lit.....	365
6.3.5. Conclusion.....	367
6.4. Essais de pavage.....	369
6.4.1. Objectifs	369
6.4.2. Description des essais	369
6.4.3. Résultats	370
6.5. Conclusion	374
6.6. Liste des figures.....	376

6.1. Objectifs

Les essais précédents (chapitre 4 & 5) ont été réalisés dans des conditions assez épurées pour permettre de comprendre les phénomènes entrant en jeu et - au moins dans le cadre du canal étroit - pour pouvoir quantifier le tri granulométrique en fonction des conditions hydrauliques.

Cependant, il s'agit de conditions beaucoup trop simples pour pouvoir être directement comparées aux observations de terrain. Deux hypothèses sont trop fortes pour être conservées lors de l'étude de la morphologie : l'absence d'apport solide en amont et un débit liquide constant (hormis pendant les dix premières minutes des essais). De plus, il semble que le caractère transitoire des crues et la surface disponible pour les divagations soient prépondérants lors de l'étude de la morphologie.

Aussi, l'observation d'une crue complexe sur une vaste zone peut fournir des éléments importants pour comprendre la dynamique torrentielle. Mais, plus encore que durant les essais précédents, il est extrêmement difficile de quantifier les différents paramètres et ce chapitre est plus destiné à décrire des phénomènes et à en comprendre le fonctionnement qu'à aboutir à de nouvelles formulations.

Après une description du mode opératoire, le comportement de l'écoulement sera détaillé, la formation et le rôle de chaque morphologie étant abordés. L'attention sera portée vers l'imbrication des échelles et sur les rapports entre la taille du modèle, celle des structures morphologiques et celle de l'écoulement.

Enfin, en continuité avec les expériences précédentes, la formation du lit pavé sera abordée à partir de deux essais de tarissement du débit solide après une forte crue.

6.2. Mode opératoire

6.2.1. Modèle utilisé

Un modèle réduit de grande taille avec une granulométrie étendue est souvent trop lourd à mettre en oeuvre dans le cadre d'un travail de recherche. Ainsi, ces travaux ont été conduits à partir d'essais destinés au dimensionnement d'une plage de dépôt sur le torrent du *S^t Vincent*. Ces essais ont été conduits sur la plate-forme torrentielle¹ situé au laboratoire de SOGREAH.

Il s'agit d'un torrent s'écoulant sur le versant nord du Massif du *Canigou*. L'écoulement se charge dans une imposante moraine au niveau du bassin de réception et rejoint, par une gorge étroite, une vaste zone de dépôt située juste en amont du village de *Vernet - les - Bains*¹. Les divagations du torrent peuvent alors se révéler extrêmement dangereuses. C'est dans cette zone que SOGREAH a été chargée de dimensionner une plage de dépôt, résistant aux crues exceptionnelles susceptibles de se produire dans les Pyrénées Orientales (on parle d'un volume transporté de 500 000 m³ durant la crue de 1940!).

Cette étude a été réalisée à la demande du service RTM des Pyrénées Orientales, car les phénomènes physiques présentent dans cette région une ampleur inaccoutumée et parce que les enjeux sont très importants. Elle illustre bien la tendance actuelle qui privilégie une défense passive et rapprochée par rapport à une défense active dans le haut du bassin versant.

Pour ce torrent, le transport par charriage semble être le mode de transport dominant. Sur modèle réduit, des simulations de laves torrentielles ont été conduites pour parfaire l'étude, mais elles ne seront pas abordées ici.

Deux types de crue ont été retenus :

- **Une crue type 1970** capable de se produire en moyenne quatre à cinq fois par siècle. C'est une crue qui correspond au fonctionnement "nominal" des ouvrages.
- **Une crue type 1940** qui s'est produite en même temps que les crues exceptionnelles du Tech, du Cady et de la Têt. Une telle crue est plusieurs fois centennale. Le fonctionnement des ouvrages est vérifié avec un tel épisode.

Ce travail a donné lieu à deux rapports, le premier dans le cadre d'un projet de fin d'étude - KRAGE, OUAHID & WAWRZYNIAK (1992) - l'autre étant le rapport de la SOGREAH rédigé par Messieurs LEFEBVRE et LEFORT (*Torrent de Saint-Vincent - Etude sur modèle réduit pour l'aménagement d'une plage de dépôt - 1992*).

Une première étape de ce genre d'étude consiste à régler le modèle, c'est à dire à déterminer les paramètres de fonctionnement du système conduisant à des résultats plausibles lors de la reproduction de crues historiques. Cette démarche est détaillée par la suite.

¹ Ce signe signale les termes définis dans le glossaire.

¹ Une description plus détaillée de ce torrent se trouve au chapitre 7.

Durant cette étape de calage, les phénomènes torrentiels peuvent se développer librement. C'est donc essentiellement ces essais qui sont utilisés ici.

Le tableau ci dessous indique quelques caractéristiques du modèle :

		Modèle	Nature
Plate-forme	Longueur	15 m	1200 m
	Largeur	3.75 m	300 m
	Pente	12 %	12 %
	Dénivelée	1.8 m	144 m
Débit maximum	Liquide	3.2 l/s	180 m ³ /s
	Solide entrant	20 l/mn	19 m ³ /s
Volume solide	Entrant maxi	1 m ³	500 000 m ³

6.2.2. Particularités du calage d'un modèle réduit en vue de l'étude de la morphologie

Le calage d'un modèle réduit est un travail important et difficile. Il détermine le fonctionnement du modèle et la justesse de la reproduction des phénomènes.

Dans les essais décrits lors des chapitres précédents, les protocoles étaient extrêmement simples et il ne s'agissait pas de reproduire la réalité mais seulement d'en isoler un aspect. La notion de calage n'avait alors aucun sens.

Ici, l'objectif est tout autre et il est nécessaire de bien connaître les hypothèses pour pouvoir effectuer une comparaison pertinente avec la réalité et expliquer les écarts observés.

Le calage et la pertinence du modèle réduit sont très dépendants des phénomènes que l'on désire reproduire :

- Dans le cadre d'**études d'aménagements**, on considère uniquement les débits de crues. Les phénomènes physiques sont alors relativement bien connus, et leur reproduction sur modèle est assez bien maîtrisée pour que les résultats obtenus soient très fiables. C'est le cas des études réalisées sur le torrent du *St Vincent*.
- Au contraire, pour l'**étude de la morphologie torrentielle et du pavage**, les phénomènes sont beaucoup plus complexes, mal connus et sensibles aux influences extérieures. Dans ce cadre, le calage du modèle est d'autant plus difficile que ce type de phénomène n'est jamais considéré dans le cadre d'étude d'applications, les écoulements secondaires n'ayant généralement qu'une influence réduite sur le fonctionnement d'ouvrages de protection.

La présentation du calage du modèle reproduit donc ces deux aspects :

1. On va reproduire les explications fournies dans le rapport de SOGREAH concernant le calage des modèles réduits car ce laboratoire est le plus en pointe actuellement en France pour la modélisation physique des phénomènes torrentiels. Ce travail permet donc d'avoir une bonne idée des hypothèses habituellement retenues. D'autre part, la qualité du travail réalisé à cette occasion et la pertinence des questions posées lors du passage de la nature au modèle témoignent de l'expérience acquise par ce bureau d'études dans ce domaine.
Cette étape est importante car le modèle réduit est d'autant plus employé pour l'étude des écoulements granulaires en torrent que la similitude est simple et permet des rapports d'échelles assez grands. En effet, elle ne nécessite pas de distorsion d'échelle, au contraire des modèles destinés à la reproduction des phénomènes liés aux vases et au sable.
2. Les notes sont un ajout personnel destiné à insister sur les particularités des phénomènes correspondant à la formation du lit par de faibles débits. Il s'agit d'insister sur les limites du modèle réduit dans ce cadre très particulier. L'objectif est de montrer qu'un calage pertinent pour l'étude des crues n'est pas forcément suffisant dans le cadre de l'étude du pavage.

"

1. OBJET DU REGLAGE

Les opérations de "Réglage" du modèle réduit désignent la phase préliminaire des essais destinée à s'assurer de la représentativité correcte des phénomènes en réduction par rapport aux phénomènes réels.

Il ne suffit pas en effet de se placer dans le cadre d'une similitude mathématique permettant la correspondance entre le modèle et la nature, encore faut-il ajuster les différents paramètres "réglables" (que peuvent constituer la rugosité du lit et des berges, les sinuosités des bras vifs, les relations débit liquide-débit solide ...etc) pour que cette représentativité soit bien assurée dans le domaine de travail fixé par l'étude².

Dans le cas général, le réglage est réalisé par la reproduction de phénomènes connus et observés dans la nature, pour des crues réelles qui vont se produire ; l'ajustement des paramètres est effectué jusqu'à

² On a vu au chapitre 1 que, même pour les écoulements d'eau claire, la similitude n'est jamais respectée à la fois pour le nombre de Froude et celui de Reynolds. Cependant, en hydraulique torrentielle la condition de Reynolds minimum est facilement atteinte (un débit unitaire de 2 l/s/m correspond à $\mathcal{R}=2000$).
D'autre part, la reproduction de particularités de terrain (rugosité locale par exemple) nécessite l'emploi de matériels spécifiques dont l'emploi ne peut être validé que lors du calage. Ainsi, le modèle réduit présente une certaine marge de manœuvre et certains paramètres peuvent être ajustés tant qu'ils restent dans des limites acceptables. Le modèle réduit n'est donc pas un outil "absolu" mais présente une certaine subjectivité qui est d'autant plus grande que le modèle est complexe.

l'obtention des critères homologues (par exemple les hauteurs d'eau en fonction du débit, ou les vitesses d'écoulement ...)³.

Le cas particulier du torrent du S^t Vincent est un peu différent de ce schéma général.

II. LE REGLAGE SPECIFIQUE DU MODELE DU SAINT VINCENT

En effet, le comportement du torrent sur son cône de déjection est très variable, et de façon partiellement aléatoire, la même crue pouvant se traduire par des divagations et des caractéristiques hydrauliques du lit tout à fait différentes⁴.

Il ne peut donc être question de chercher à reproduire des hauteurs d'eau ou des tracés de lit, qui ne seraient pas significatifs.

On ne dispose d'ailleurs pas de données réellement mesurées dans la nature pour des crues observées (mais ce n'est pas cette raison qui motive la méthodologie suivie).

Toute autre est la démarche suivie pour cette étude.

L'objectif à atteindre est d'obtenir un torrent qui réagisse globalement de la même façon que le S^t Vincent aux sollicitations extérieures (apport d'eau et de matériaux), et d'obtenir d'autre part une situation répétitive de l'état naturel du cône de déjection, suffisamment stable pour pouvoir constituer un état de référence fixe, permettant la comparaison ultérieure des solutions d'aménagement avec l'état naturel, ou des différentes solutions entre elles⁵.

³ Le modèle "de rivière" - bien que généralement à fond mobile - est avant tout hydraulique : ce sont les propriétés de l'écoulement qui présentent le meilleur critère pour valider le modèle. On va voir qu'il n'en est rien pour le modèle "torrentiel".

⁴ Il est difficile de mieux exprimer la difficulté de l'approche de la morphologie torrentielle. Il semble cependant que, si les dessins sont toujours changeants, ils restent dans une "enveloppe" de fonctionnement présentant - comme lors des essais en canal de 60 cm de large - des caractéristiques générales communes.

Toutefois, le comportement du modèle du S^t Vincent s'est révélé beaucoup trop complexe pour servir - dans l'état actuel des connaissances - de critère de similitude entre nature et modèle.

⁵ Il apparaît nettement ici que l'on sort du domaine d'étude du modèle réduit : l'évolution à long terme du lit. Si cet aspect n'intervient pas dans le cadre de l'étude d'un ouvrage, il se pose deux problèmes totalement distincts lorsqu'on veut l'aborder :

- Le comportement d'un torrent comme le S^t Vincent n'est pas connu avec assez de précision pour pouvoir déterminer l'effet d'une crue (même d'hydrogramme défini) sur le cône de dépôt. En effet, sur le très long terme, les cônes de dépôts évoluent tellement que la pente peut être modifiée. En fait, la notion "d'âge du cône" intervient dans le suivi de son évolution (BERNARD (1927); CARRET (1979)). Il est donc difficile de savoir comment doit évoluer le cône de dépôt d'un torrent lors d'une forte crue. Il y a donc une limite d'ordre scientifique.

- D'autre part, la reproductivité est indispensable pour comparer les différentes solutions à un aménagement. Or, il est nécessaire d'obtenir un lit structuré correspondant à un "point 0" avant de réaliser les expériences. Si cela est possible en quelques minutes à partir d'un lit remanié sur un petit canal, une telle démarche devient irréaliste lorsque le modèle devient de grande taille : non seulement il serait indispensable de

Suite de note page suivante...

Ces deux buts sont partiellement contradictoires : en effet (et c'est ce qui a été constaté au cours des premiers essais de réglage), la succession d'une série de crues de faible fréquence (par exemple centennale), fait vivre au torrent une évolution sur plusieurs siècles, voire sur un millénaire, qui implique une dérive (engraissement du cône de déjection) tout à fait hors d'échelle du problème pratique posé : concevoir un aménagement adapté au torrent à l'échelle humaine actuelle, c'est à dire pour les quelques décennies prochaines seulement.

Le critère qui a donc été retenu est celui d'une stabilité relative du cône existant, se traduisant par le maintien d'une pente de 12 % (pente actuelle) pour le passage d'une crue type de projet, de caractéristiques comparables à celles de la crue d'octobre 1970. L'essai ultime, après acquisition d'un réglage satisfaisant, d'une crue de caractéristiques comparables à celles de la crue d'octobre 1940, doit permettre en outre de confirmer si le comportement du torrent reste plausible pour un phénomène nettement au-delà des hypothèses de projet⁶.

I. OBTENTION INITIALE DES HYDROGRAMMES ET DES DIAGRAMMES DE DEBITS SOLIDES.

Le débit liquide injecté dans le modèle à été déduit de l'hydrogramme tiré du rapport de D. Richard. On a simplifié les courbes en les subdivisant en 7 paliers de 12.5 minutes pour les crues de "type 1970" et en 9 paliers de 15 minutes pour les crues de "type 1940"⁷.

Au début de l'essai, un débit faible permet de mouiller le lit; un dernier palier avec le même débit faible met en valeur le phénomène de pavage.

déplacer de grandes quantités de matériaux, mais la préparation "hydraulique" du modèle nécessiterait la reproduction de cycles de crue durant plusieurs heures. Il apparaît donc nécessaire, pour des raisons essentiellement pratiques, que chaque cycle de crue ne modifie pas globalement le modèle. De plus la sensibilité des résultats au protocole de préparation du lit n'est pas connue.

- ⁶ Le réglage obtenu n'est *a priori* valable que dans une fourchette réduite de conditions hydrauliques. En effet, les relations [débit solide-débit liquide] mais aussi la granulométrie sont très dépendantes du débit liquide. Cependant, l'excellent comportement du modèle pour la crue type 1940 montre la pertinence des réglages réalisés ici et renforce leur validité.
- ⁷ Il s'agit en fait d'approximations assez grossières comme le montre la figure 6-1. De même, aucune étude de sensibilité du modèle n'est faite sur le débit de pointe, la forme de l'hydrogramme ou sa durée. Le contraste avec le soin apporté à l'étude du transport solide montre clairement que, dans le cas des études torrentielles, l'hydrologie est secondaire par rapport au transport solide.

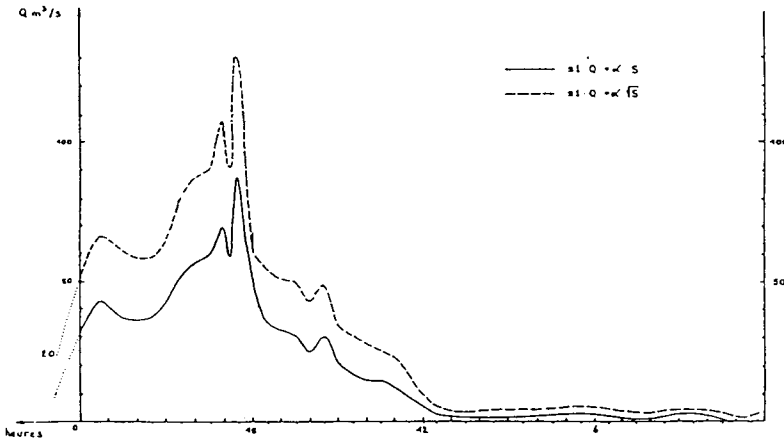


Figure 6-1 : Hydrogramme reconstitué pour une crue type 1970 (D'après rapport SOGREAH 1992).

Le diagramme de débits solide a été obtenu en appliquant la formule de SOGREAH (1990), (...) au débit liquide de chaque palier de temps de l'hydrogramme de chaque crue, ce qui donne les diagrammes de débits solides présentés dans les figures 6-2 et 6-5.

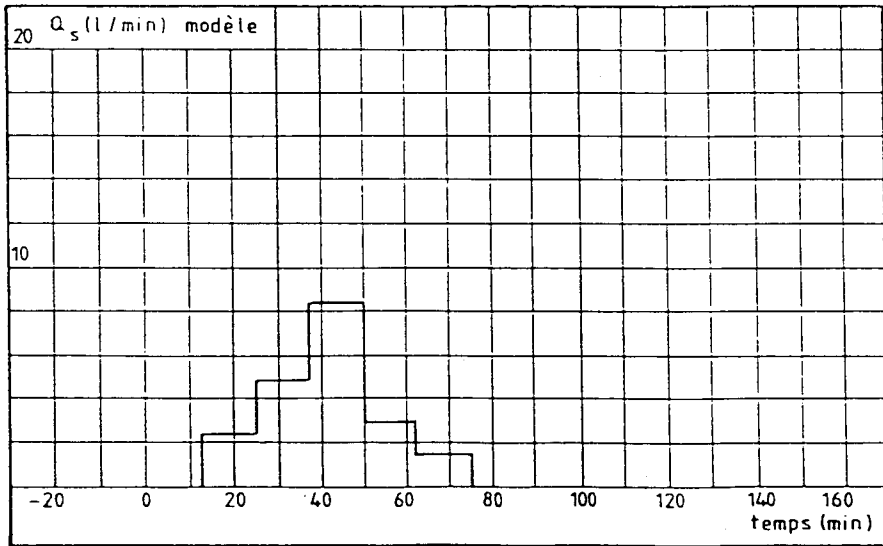


Figure 6-2 : Sédimentogramme du matériau injecté pour une crue type 1970 (D'après rapport SOGREAH 1992).

Les courbes du débit solide en fonction du débit liquide sont présentées ci dessous.

La loi Q_s en fonction de Q_l est à la fois une donnée et une variable, puisque l'hydrogramme de chaque crue est partiellement connu⁸.

En premier lieu, le réglage sera effectué pour la crue "type 1970", et c'est à la fin seulement que l'état obtenu sera contrôlé pour la crue "type 1940".

II. GRANULOMETRIE INITIALE DES MATERIAUX UTILISES.

La détermination de la granulométrie du modèle se base sur les mesures effectuées sur le cône de déjection du S^t Vincent en mars 1991. Or on a observé une grande diversité des granulométries, soit le long des transects, soit le long du lit du torrent.

En outre, la composition des matériaux charriés ne peut être obtenue qu'à partir de la granulométrie des Conques où se charge l'écoulement du S^t Vincent. Il est probable qu'elle dépende largement du débit liquide⁹.

Par conséquent, on a eu conscience de la difficulté de déterminer la courbe granulométrique du modèle et des matériaux injectés. Ainsi, on a choisi la granulométrie comme semi variable, en commençant le réglage avec une composition des matériaux déduite des mesures sur place, puis en la modifiant afin de maintenir la pente naturelle de 12 %¹⁰.

⁸ On retrouve ici le premier objectif des réglages : donner au modèle un comportement plausible. En fait, cette démarche vise à obtenir un système cohérent, les données étant trop rares et le comportement d'un torrent trop peu connu. Il est donc possible de prendre du recul par rapport à des relations dont la fourchette d'incertitude est importante.

⁹ Là encore, deux obstacles viennent s'opposer à une reproduction fidèle du torrent à proximité du seuil de début de mouvement :

- Sur le plan théorique, l'évolution de la granulométrie injectée en amont en fonction des conditions d'écoulement n'est pas connue. Il semble que les variations soient très importantes. Dans la nature, la granulométrie transportée dépend sans doute de l'apport en matériaux mais aussi des conditions de cheminement et de tri avant d'arriver sur le cône. Il n'est donc pas possible actuellement de proposer de relation plausible entre conditions hydrauliques et granulométrie apportée en amont du cône, surtout si l'on y inclut des fluctuations temporelles.
- Sur le plan pratique, l'introduction de matériaux de granulométrie variable pose de réels problèmes.

C'est en particulier cette condition de granulométrie injectée unique qui explique que le modèle ne fonctionne que pour des débits relativement important (nettement au dessus du seuil de début de mouvement). D'autre part, elle impose de raisonner directement sur la granulométrie apportée *moyenne* durant toute une crue. L'injection de matériaux probablement trop gros en début et fin de crue et trop fins au coeur de la crue a sans doute une influence assez importante sur la morphologie du torrent.

Cependant, loin du seuil de début de mouvement, le tri granulométrique du torrent est assez faible. Ainsi, il est sans doute assez rigoureux d'utiliser la même granulométrie pour une crue forte (type 1970) ou exceptionnelle (type 1940). De plus, il faut noter que dans le cadre de ces essais, la granulométrie du lit et celle apportée ont été distinguées, conduisant à un modèle nettement plus proche de la réalité.

¹⁰ Les mesures de terrain n'ont pas permis de choisir de façon sûre une granulométrie. Dans un premier temps, on a fait l'hypothèse que la granulométrie injectée était celle de la zone d'érosion (absence de tri et d'usure dans les gorges). Les liens entre la granulométrie du lit et celle qui est transportée n'étant pas établis, il a été nécessaire, là encore, d'ajuster ce paramètre lors du réglage pour obtenir un comportement satisfaisant.

III. MODE OPERATOIRE ET RESULTAT DU REGLAGE

(...) Les essais n° 10, 11, 12, 13 et 14 ont été effectués avec une simulation de crue "type 1970" sur le cône à l'état naturel non aménagé.

L'essai 15, conclusion de la phase de réglage a montré les conséquences de la simulation d'une crue de "type 1940".

Les ajustements successifs pour aboutir au réglage définitif ont porté :

- sur la granulométrie des matériaux
- sur les rapports débit solide - débit liquide.

Un contrôle très détaillé des granulométries :

- du matériau en place dans le modèle,
- du matériau injecté pendant la crue,
- du matériau sortant du modèle en différenciant chaque palier de débit,
- du matériau qui subsiste dans le lit après la crue,

... a été effectué pour suivre l'évolution du torrent, et pour être en mesure d'interpréter les résultats acquis au fur et à mesure des essais (...).

Les essais successifs ont mis en évidence la différence importante entre la granulométrie des matériaux charriés et celle des matériaux en place qui subsistent sur le cône, ce qui a permis de corriger les valeurs initiales issues des relevés de surface effectués sur le terrain¹¹.

L'essai n°10 notamment a permis de constater que les matériaux injectés étaient trop grossiers et s'accumulaient à l'amont du modèle avec une pente forte sans pouvoir transiter vers l'aval en proportion suffisante : on a donc réduit la granulométrie des matériaux d'apport, sans modifier celle du matériau en place qui a subi un pavage.

D'autre part, il a été nécessaire d'ajuster avec plus de précision la relation débit liquide-débit solide, en différenciant notamment (au cours des essais n°11 et 13) les rapports à la crue (écoulements plus chargés) et à la décrue (écoulements moins chargés) sans modifier le volume global¹².

¹¹ Il est donc indispensable de bien distinguer les différentes granulométries que l'on mesure et de savoir à quel phénomène elles correspondent. D'autre part, comme on l'a déjà remarqué sur les modèles précédents, granulométrie du lit et granulométrie transportée évoluent de façons très différentes et la mesure de celle du lit ne permet pas de connaître directement celle des éléments transportés. Il est alors nécessaire, lors du réglage du modèle de rechercher la granulométrie des éléments injectés indépendamment de celle du lit.

¹² Cette distinction se justifie en considérant que le début de la crue mobilise les matériaux disponibles dans le lit, et qu'ensuite la fourniture de sédiments est plus réduite. Il est cependant difficile de connaître la validité de cette hypothèse. Elle conduit - en exagérant - à recouvrir le lit de la zone de dépôt de matériaux au début de crue, et à les reprendre à la fin. Si l'explication avancée est plausible, cet écart est déterminé à partir de considérations morphologiques durant le déroulement de la crue. Un avantage de cette démarche est de

Suite de note page suivante...

Ces ajustements successifs, ainsi qu'un allongement du dernier palier de l'hydrogramme (débit liquide faible, sans charriage : phase de pavage résiduel du lit), ont permis d'obtenir pour les essais n°13 et 14 une stabilité satisfaisante du lit, dont la pente est maintenue à 12 %, et dont le bilan volumétrique reste très réduit ($-35 l < v < +27 l$)¹³.

Ce sont donc les conditions de ces essais qui ont été retenues pour l'état de référence.

Enfin, la simulation de la crue de 1940, avec apport de l'ordre de 500 000 m³, produit des effets qui correspondent à un comportement tout à fait plausible de la crue, d'après les renseignements dont on dispose (photos), notamment en ce qui concerne les phénomènes de divagation du lit et des chenaux multiples, de mise en charge du Pont de Fillols, de débordement du lit canalisé d'aval, et d'engrèvement de ses berges (compte tenu des modifications des lieux intervenues depuis)."

Ainsi, au contraire des modèles fluviaux, les modèles torrentiels ne sont calés que par rapport au transport solide, les conditions hydrauliques apparaissant comme un phénomène secondaire¹⁴.

Le modèle réduit apparaît donc comme un outil relativement souple d'utilisation. Si cet aspect est sans importance pour les études d'ouvrages durant les crues, les hypothèses de fonctionnement lors de l'étude du pavage du lit par un faible débit liquide sont beaucoup plus importantes.

Le modèle n'est donc que partiellement capable d'apporter des éléments nouveaux sur la morphologie torrentielle dans la mesure où celle-ci dépend du réglage. Cependant, les phénomènes de base sont reproduits par le modèle et le réglage (au moins dans ce cas) est assez précis et cohérent pour que la validité des observations soit satisfaisante.

Cependant, toujours pour des conditions hydrauliques réduites, le modèle se révèle insuffisant sur deux points :

- ◆ La reproduction des phénomènes liés à la cohésion des matériaux. On a vu en effet qu'il est nécessaire d'effectuer une troncature de la courbe granulométrique en supprimant les matériaux les plus fins. Cette modification, indispensable, rend douteuse la représentation des phénomènes d'érosion, d'arrachement et même, dans une certaine mesure, de dépôt lorsque l'on est à proximité du seuil de début de transport.

minimiser l'influence du lit initial. De plus, il force le lit à changer de morphologie dès les premiers instants de la crue.

Il faut noter qu'il ne s'agit pas d'un résultat du réglage mais d'une hypothèse s'efforçant de suivre la vidange des Conques pour une définition plus sûre des ouvrages.

¹³ Le volume cumulé sortant du modèle durant ces deux essais est respectivement de 250 et 260 litres.

¹⁴ En fait, l'interaction entre les deux phénomènes est assez forte pour que le calage d'un élément soit suffisant pour que l'autre soit reproduit avec fidélité.

- ◆ Les phénomènes à long terme (concernant directement l'écoulement mais aussi la transformation des sols) ne peuvent être pris en compte. Cependant, leur influence est mal connue, et probablement secondaire lors des fortes crues.

Les deux granulométries finalement retenues pour le fonctionnement du modèle sont les suivantes :

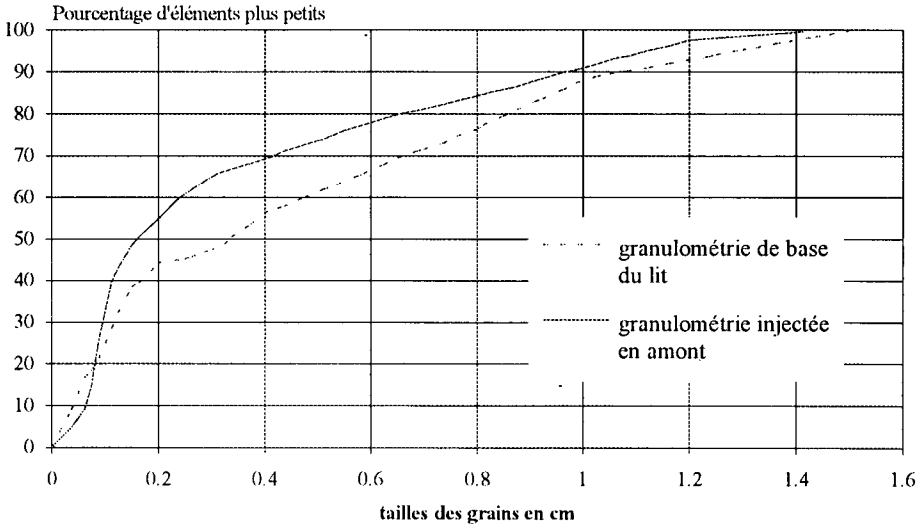


Figure 6-3 : Granulométries utilisées pour le fonctionnement du modèle après calage.

6.2.3. Paramètres mesurés

Il s'agit des paramètres classiquement mesurés dans le cadre d'une telle étude. La figure suivante est un plan simplifié du modèle et indique les sites de mesure.

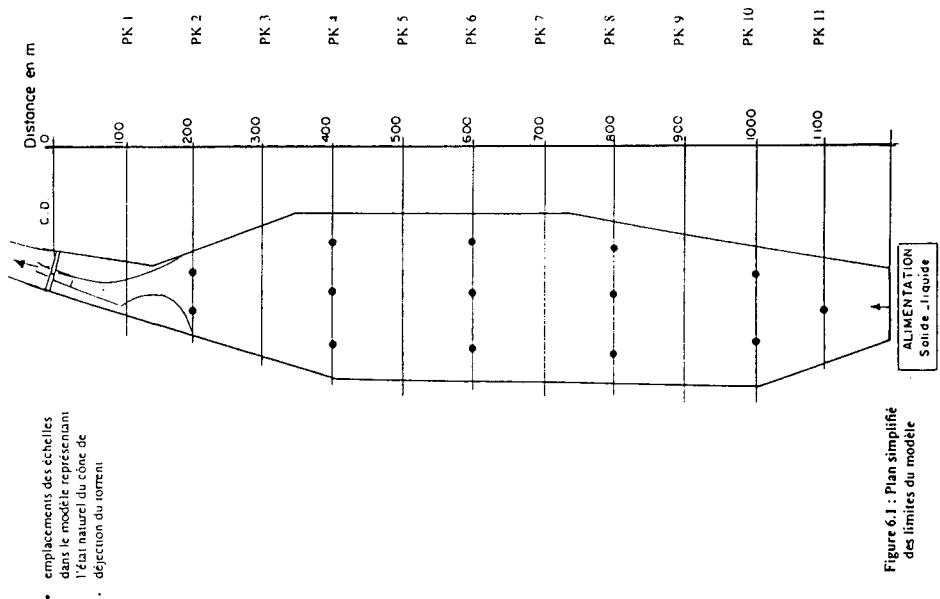


Figure 6-4 : Plan simplifié des limites du modèle (d'après SOGREAH 1992).

Mesure sur les matériaux sortants :

- **Mesure du débit solide** en réalisant un prélèvement à chaque palier de la crue simulée. Il est alors possible de calculer le débit solide sortant. Les prélèvements étaient réalisés durant plusieurs minutes afin d'obtenir une valeur moyenne, indépendante des pulsations de transport solide.
- **Mesure ponctuelle de la granulométrie transportée** à partir de certains de ces prélèvements. Il ne s'agit cependant pas d'un contrôle systématique, mais seulement de mesures ponctuelles¹⁵.
- **Cubage en fin d'essai** pour établir le bilan volumétrique.

Mesure sur les matériaux entrants :

- **Cubage en fin d'essai** du volume sorti de la trémie amont.

Mesure sur le lit :

- **Relevés de profils transversaux** par Limnidyns¹⁶ avant et après chaque essai.
- **Lecture des échelles.**

¹⁵ Un contrôle systématique aurait été très difficilement réalisable, puisque les essais correspondent à un volume de 265 à 1000 l.

¹⁶ Il s'agit d'un appareil réalisé par la SOGREAH et destiné au relevé des fonds de modèles sédimentologiques.

6.2.4. Particularités de chacun des essais

On ne considère dans ce paragraphe que les essais qui ont servi au calage du modèle. Les essais 10 à 13 ont permis de réaliser le calage. Les essais 14 et 15 l'ont validé, respectivement avec une crue type 1970 et une crue type 1940.

La figure ci-dessous montre les hydrogrammes solide et liquide durant cet essai :

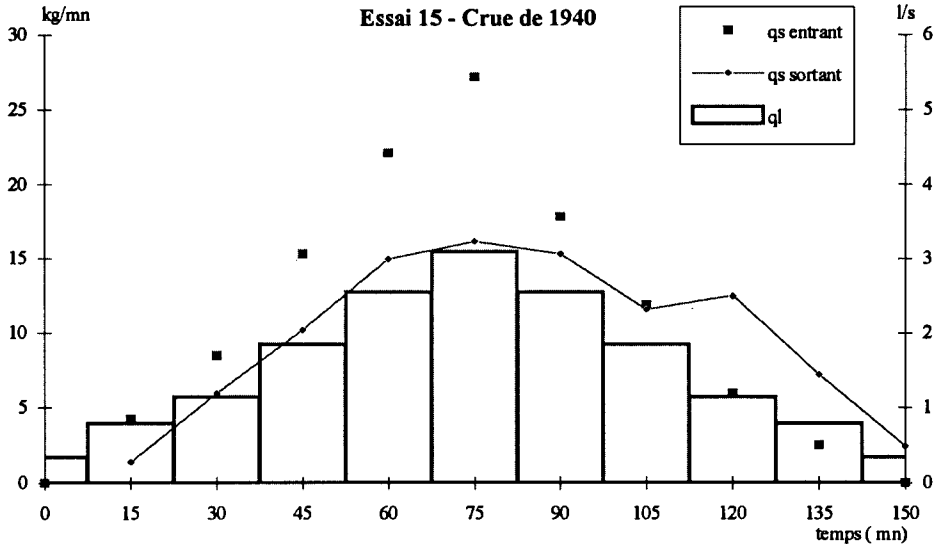


Figure 6-5 : Hydrogrammes solide et liquide durant l'essai 15.

Un écart important apparaît entre le débit solide entrant et celui mesuré à la sortie du modèle. Ainsi, la pointe de la crue est totalement laminée par le modèle. La zone de dépôt a donc un rôle de régulation important.

Le tableau suivant reprend les caractéristiques de chacun des paliers de l'essai 15 :

Palier (durée 15 mn)	Débit liquide (l/s)	Débit solide entrant (l/mn)	Débit solide sortant (l/mn)
0	0.35	0	0.83
1	0.80	2.5	3.5
2	1.15	5.0	6.0
3	1.85	9.0	8.8
4	2.55	13.0	9.5
5	3.10	16.0	9.0
6	2.55	10.5	6.8
7	1.85	7.0	7.35
8	1.15	3.5	4.25
9	0.80	1.5	1.44
10	0.35	0	

Ainsi, la figure suivante montre, pour chaque pas de temps l'évolution du débit solide sortant en fonction du débit liquide.

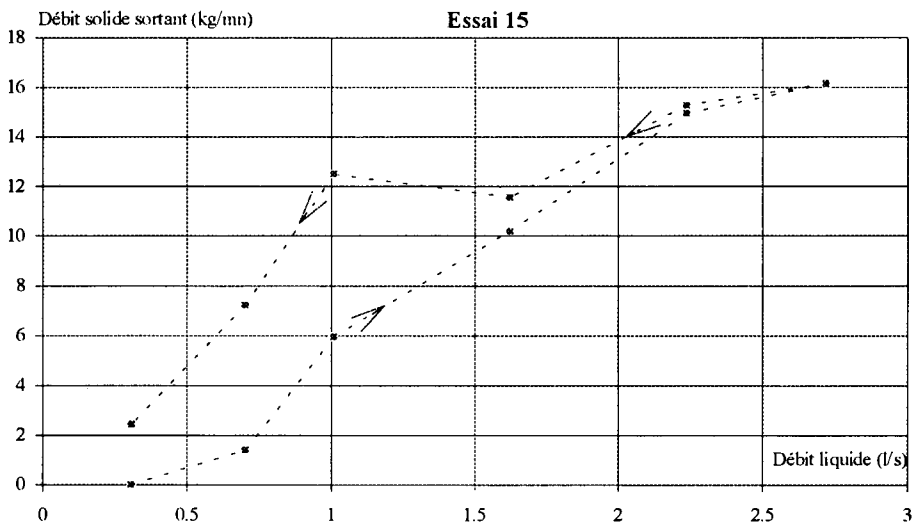


Figure 6-6 : Débit solide sortant en fonction du débit liquide injecté dans le modèle.

Il apparaît clairement un phénomène d'hystérésis qui indique que la propagation du transport solide des matériaux se déplace beaucoup plus lentement que le liquide. Le modèle s'engraisse durant la première partie de l'essai, et l'érosion ne se produit que durant les trois derniers paliers. Ainsi, l'absence de neutralité du modèle indique d'importantes fluctuations morphologiques au cours de la crue.

D'autre part, le canal à biefs affouillables construit à l'aval du modèle¹⁷ - même dans la phase de calage car il s'agit d'un ouvrage existant - influence notablement le débit solide. On observe en effet une zone de stockage en amont de l'entonnement durant la première partie des essais, puis une reprise des matériaux par la suite. Le stockage intermédiaire (de l'ordre d'une centaine de litres soit le dixième du volume transporté par la crue) suffit à expliquer d'importants écarts entre les débits solides entrant et sortant.

Cependant, des irrégularités du débit solide apparaissent malgré la régulation effectuée par le canal à biefs affouillables indiquant ainsi l'influence des phénomènes liés au charriage torrentiel. La description de l'ensemble de ces phénomènes de transport solide à forte pente est l'objet du paragraphe suivant.

¹⁷ Cet ouvrage a été dimensionné sur modèle réduit par le *Laboratoire National d'Hydraulique* de l'EDF à Chatou pour un débit liquide maximal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un débit solide à saturation et de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un écoulement d'eau claire. Il apparaît donc comme nettement sous dimensionné pour une crue de type 1940, et à la limite de capacité pour les crues types 1970.

6.3. Observations expérimentales

6.3.1. Introduction

La méthode retenue ici consiste à décrire l'évolution du lit du modèle du torrent de *St Vincent* au cours d'une crue et à essayer d'expliquer les différents phénomènes et les diverses morphologies à la lumière des essais réalisés en canal de 10 et de 60 cm de largeur.

Plus encore que dans le cas du canal de 2 m × 0.60 cm, la description des différents éléments morphologiques est difficile tant ils sont mêlés. D'autre part, la description de structures morphologiques est largement subjective et la distinction d'une structure par rapport à une autre est difficile. Ainsi, comme aux chapitres précédents, les essais sont décrits à partir d'une division en quatre phases basée sur l'intensité du transport solide :

1. Préparation du lit pour un transport solide important ;
2. Période de débit solide élevé ;
3. Formation du dessin en plan final ;
4. Pavage du lit.

Cependant, dans ce cas, les limites de chaque phase sont essentiellement basées sur des caractéristiques morphologiques. Il s'agit donc de critères plus subjectifs, en accord avec l'approche réalisée dans ce chapitre.

La plupart des observations sont basées sur l'essai n°15, d'une part parce qu'il est l'aboutissement de la phase de réglage, mais aussi parce qu'il correspond à une crue plusieurs fois centennale. Les conditions hydrauliques balayent donc une gamme très étendue. Enfin, par rapport aux autres, cet essai n'a pas montré de différence sur la nature des phénomènes, mais seulement sur leur ampleur. Il est donc très représentatif. D'autre part, un essai de pavage a été réalisé directement à l'issue de cet essai. Il est l'objet du paragraphe 6-4. La figure 6-5 montre l'hydrogramme et le sédimentogramme pour l'essai 15.

6.3.2. Préparation de la crue

Durant la fin de l'essai précédent et la saturation en eau du modèle, un pavage a été formé (avec un débit liquide de 0.35 l/s qui correspond à 20 m³/s en nature). Le lit est alors très stable.

Cependant, dès le début du premier palier (débit liquide 0.8 l/s), le lit est déstabilisé et le transport s'établit rapidement. Il semble que cette déstabilisation se produit d'abord en amont et que les premiers matériaux qui y sont arrachés contribuent largement à la mise en mouvement des zones plus en aval. Cependant, il s'agit d'un phénomène très discontinu, le départ d'un grain - ou plutôt d'un groupe de grains - se produisant essentiellement en fonction de caractéristiques locales.

Le débit solide mesuré à l'aval reste cependant particulièrement faible (2.5 l/mn). Il apparaît que l'écoulement doit d'abord modifier le lit (en diminuant le nombre de

particularités telles que les agglomérations de blocs) pour pouvoir transporter les matériaux grossiers. La taille des éléments du lit étant plus importante, il est légitime que l'établissement du transport solide soit plus difficile¹⁸ que lorsque l'essai débute à partir d'un lit non pavé.

Cette préparation du lit se traduit par un transport solide de matériaux plutôt grossiers poussés par l'écoulement. C'est le passage de ce bourrelet qui modifie la structure du lit mais il est difficile de savoir s'il s'agit du recouvrement du lit par les matériaux ou d'une restructuration de la surface. Dans ce cas, l'écoulement et cette bouffée de transport solide unissent leur force, et il est difficile de savoir lequel est prépondérant dans la déstabilisation des grains du lit. D'autre part, comme dans l'essai avec un canal de 60 cm de large, les éléments grossiers sont poussés sur le bord de l'écoulement et ne parviennent que dans une faible proportion en aval.

La figure suivante montre la granulométrie mesurée durant le second palier de l'essai 15. Il apparaît nettement que même pour un débit liquide de 1.15 l/s les matériaux grossiers sont plus difficilement transportés en début d'essai ce qui correspond à un appauvrissement du modèle en éléments moyens.

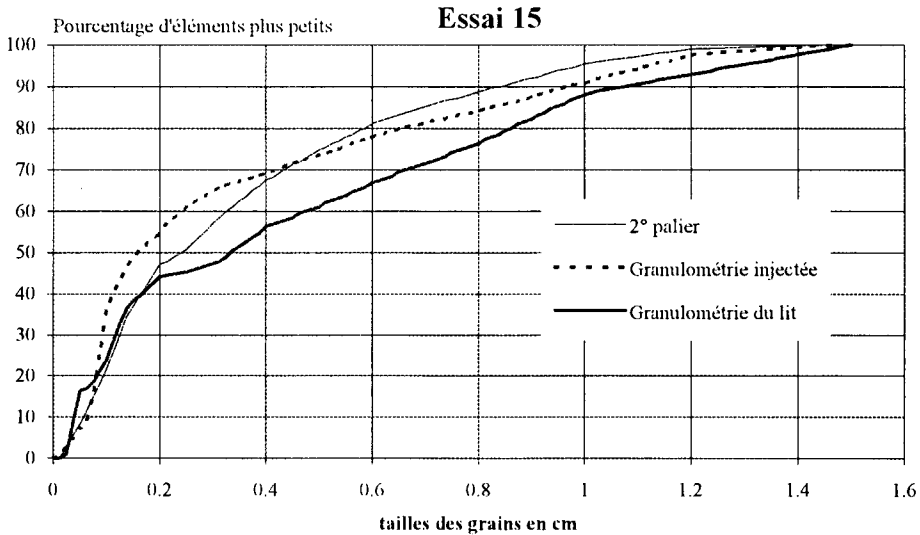


Figure 6-7 : Granulométrie transportée durant le second palier de l'essai 15.

Avec l'augmentation du débit liquide, le transport s'établit mais la fraction de débit solide sortante par rapport au débit solide entrant est toujours plus faible jusqu'au maximum de la crue.

¹⁸ On observe ici l'influence de la préparation du lit sur les phénomènes de transport solide. En effet, il n'y a pas de symétrie par rapport à la décrue, mais mise en mouvement - beaucoup plus difficile que l'arrêt - des éléments d'un lit qui a été pavé (même sommairement) à la fin de l'essai précédent.

Le comportement du torrent avec des débits liquides plus importants est maintenant décrit.

6.3.3. Phase de fort transport solide

6.3.3.1. Déplacement des matériaux

Dans ce paragraphe, le déplacement des matériaux dans l'écoulement est décrit en supposant le lit fixe. On distingue deux types de matériaux :

- **Les éléments fins** qui sont plutôt déplacés en saltation. Ils courent alors à proximité du fond à une vitesse peu différente de la vitesse locale du fluide.
- **Les éléments plus grossiers** restent en contact avec le fond du lit. Dans ce cas, le déplacement est plus complexe :
 - * D'une part, presque tous les grains se placent en travers de l'écoulement : le grand axe est horizontal et perpendiculaire à la direction de déplacement des grains. Il s'agit de la position la plus favorable au transport : la surface exposée à l'écoulement est la plus grande possible et la résistance au roulement est minimisée. Il reste difficile d'expliquer pourquoi cette position est préférée à celle de plus grande résistance au déplacement¹⁹.
 - * D'autre part, les éléments grossiers voyagent généralement en groupes serrés, chaque élément n'ayant qu'une très faible liberté de manoeuvre. Ce rapprochement des grains se produit essentiellement lors d'un ralentissement de l'écoulement lié à une réduction des contraintes hydrauliques ou à une augmentation locale de la rugosité.

Ainsi, l'arrêt d'un grain grossier est avant tout une caractéristique de l'ensemble couche en mouvement + lit. En effet, le grain présente une résistance très réduite à l'écoulement (très grande exposition et roulement facilité sur un fond de matériaux fins). Seules des interventions extérieures sont capables de l'arrêter. L'étude d'un grain isolé (dans le cas d'un fort transport solide) présente donc peu de rapport avec la réalité physique.

6.3.3.2. Instabilité du transport solide

Le caractère le plus surprenant du transport solide sur un modèle de grande taille est l'hétérogénéité des phénomènes. Il semble impossible de définir des paramètres moyens représentatifs comme on peut le faire en hydraulique classique.

Cette hétérogénéité est intrinsèque au charriage torrentiel car, dans le cas des essais sur modèle réduit, aucune discontinuité - morphologique, géométrique ou granulométrique - ne peut être avancée pour expliquer ces variations.

La difficulté de l'étude provient du fait que l'écoulement a la possibilité de changer le lit en quelques secondes (sur modèle). Ainsi, il faut considérer l'ensemble [surface du lit + écoulement] et non pas un lit invariable - même avec un faible pas de temps. En

¹⁹ Cette constatation est à rapprocher des lois de l'hydraulique des jets. En effet, un disque placé dans un écoulement tend naturellement à se placer perpendiculairement à la direction de cet écoulement.

effet, ces variations ne concernent pas seulement la position du lit mais d'abord ses caractéristiques granulométriques et l'arrangement des grains.

Le chapitre 4 a montré une caractéristique intrinsèque au charriage hyperconcentré²⁰ : un lit fin s'appauvrit en éléments grossiers car ceux ci sont plus faciles à transporter. Il devient encore plus fin et facilite le transport. De même, un lit grossier est capable d'arrêter les blocs car il leur offre des appuis pour résister à l'écoulement. Il devient alors encore plus grossier.

Or, ces instabilités doivent disposer d'espace pour pouvoir se développer. Elles ne sont donc pas assez importantes pour être visibles dans le canal de 10 cm de large. Seule une étude fine de la granulométrie du lit et de celle des éléments transportés avait alors permis de mettre cette caractéristique en évidence.

Pour le canal de 60 cm de largeur, il apparaissait quelquefois des structures élémentaires qui traduisaient ce phénomène.

Dans le cadre du modèle de grande taille, le caractère instable des interactions entre le lit et l'écoulement apparaît pleinement. Ainsi, l'écoulement présente une succession de particularités, correspondant soit à un lit grossier, soit à un lit fin. Il semble que toutes ces discontinuités peuvent être considérées comme des dunes à forte pente plus ou moins développées.

6.3.3.3. Dunes à forte pente

Ces structures, décrites par MIZUYAMA (voir paragraphe 2.7.7), ont pu être observées à de multiples reprises, tant sur modèle que sur torrents naturels. Elles peuvent être schématisées de la façon suivante :

²⁰ Des conditions hydrauliques très supérieures à celle de début de mouvement sont indispensables à cette évolution.

Dune à forte pente

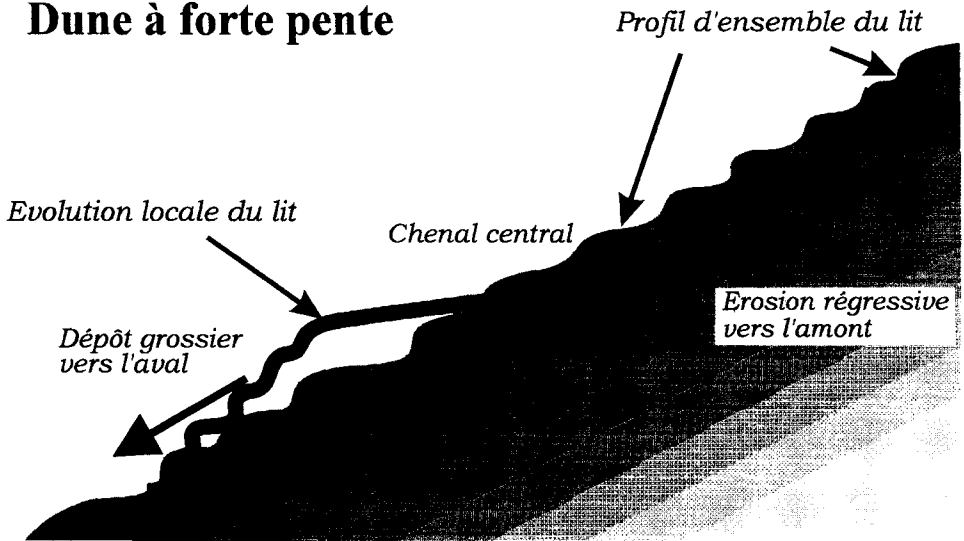


Figure 6-8 : Schéma d'une section longitudinale de dune à forte pente.

Ainsi, l'instabilité décrite précédemment permet le développement d'une structure formée de trois parties très différentes :

- **un chenal central avec un lit de matériaux fins.** La capacité de transport est telle que le lit fin, malgré une pente nettement réduite²¹, permet un débit solide bien supérieur à la valeur moyenne de l'ensemble du lit²². Dans cette partie, l'écoulement est très rapide et rectiligne et le lit est relativement étroit. Les blocs sont roulés et leur grand axe est horizontal et perpendiculaire à la direction de l'écoulement. Le nombre de Froude est nettement supérieur à 1.
- **Une niche d'érosion régressive en amont.** La capacité de transport de la partie centrale permet un enfoncement du lit bien supérieur au diamètre des grains les plus gros. Ainsi, aucune structure et aucun grain ne peuvent résister à une telle érosion. Il se développe alors une zone d'affouillement de forme conique (déformée par la provenance des écoulements). L'augmentation de la surface érodée limite l'arrachement des grains. Elle ne suffit cependant pas à arrêter le phénomène. Le nombre de Froude est de l'ordre de l'unité (ou légèrement supérieur).
- **Un dépôt d'éléments grossiers en aval.** La pente de la partie centrale étant plus réduite, le lit s'élève peu à peu vers l'aval. Cette élévation permet l'élargissement de

²¹ On retrouve ici le phénomène classique de basculement de pente dans les zones où l'érosion est particulièrement élevée.

²² Il n'est cependant pas possible de mesurer ce débit solide car il présente un caractère trop local. Cependant, l'érosion en amont et le dépôt en aval montrent qu'il s'agit d'une valeur bien supérieure à la valeur moyenne sur l'ensemble du lit.

On a vu au chapitre 5 que le débit solide est nettement plus fort lorsque la largeur de l'écoulement est réduite. Or, dans ce cas, non seulement l'écoulement est nettement monodimensionnel mais, de plus, le lit est beaucoup plus fin localement que dans le cas d'un modèle d'un ou deux mètres de long.

On peut donc en conclure que le débit solide est localement au moins deux fois plus élevé que sur l'ensemble du lit.

la section mouillée. Cette divergence explique que la hauteur de l'écoulement devient alors très inférieure aux éléments les plus gros. Ceux-ci se déposent alors malgré une pente plus forte. De plus, il est nécessaire qu'un dépôt se forme à cause de la différence de capacité de transport.

Ainsi, les blocs s'arrêtent préférentiellement dans cette zone, offrant un appui à d'autres grains de grande taille. La faible submersion relative achève de détruire la structure de l'écoulement. Ainsi, la pente de cette zone peut être beaucoup plus forte que sur l'ensemble du lit. Les éléments moyens et fins, qui restent immergés dans cet écoulement à forte pente, sont emmenés vers l'aval.

Dans certains cas, ce dépôt d'éléments grossiers migre vers l'amont. Cependant, il ne parvient qu'exceptionnellement à changer la nature des écoulements dans la partie centrale²³. Ce phénomène freine la propagation de la dune à forte pente mais n'est pas suffisant pour en arrêter le développement.

Ainsi, la dune à forte pente a tendance à se développer naturellement dans un lit alluvial. Il est cependant nécessaire que de nombreuses conditions soient remplies pour observer de telles structures :

- L'écoulement doit être assez vigoureux pour amorcer - et entretenir le phénomène. En effet, il faut qu'il ait assez de force pour dégager tous les éléments grossiers d'une portion de lit. De telles structures ne se développent qu'avec un transport solide très intense, lorsque le seuil de début de mouvement des matériaux est largement dépassé.
- La granulométrie étendue - comme l'a indiqué MIZUYAMA (1977) - est indispensable. On comprend aussi, à la lecture de la description précédente, que la dune soit d'autant plus haute que la dispersion granulométrique est grande. La figure suivante montre une zone de divagation dans un modèle à forte pente²⁴. Il s'agit cependant d'une granulométrie uniforme. Il apparaît clairement que la morphologie est nettement différente et qu'aucune dune à forte pente ne parvient à se former.
- L'écoulement doit avoir assez de place pour développer un cône de dépôt à l'aval. Ainsi, la formation de dunes à forte pente est beaucoup plus difficile dans le cas d'un écoulement monodimensionnel. Elle ne peut alors exister qu'à l'état embryonnaire.
- D'autre part, il semblerait que le déplacement des matériaux par nappes de granulométrie resserrée (comme indiqué par LISLE - 1990) soit indispensable à l'amorçage de ces structures. Ainsi, il indique que :

"Les nappes se forment quand le sable et le gravier se séparent en deux zones mobiles de faible rugosité de grains (sable) et de grande rugosité (gravier). Les graviers se déplacent rapidement le long de zones lisses de sables et s'agglomèrent brutalement à l'aval ou

²³ Cependant, lorsqu'il y a tarissement du débit liquide, la capacité de transport diminue dans la partie centrale et un dépôt régressif peut alors se produire. Il ne s'agit cependant que d'une conséquence de la "mort" de la dune à forte pente et non une cause.

²⁴ Il s'agit d'un modèle de démonstration réalisé par SOGREAH en collaboration avec les services RTM et le CEMAGREF.

d'autres particules de graviers créent une friction inter granulaire importante."

Cela indique que le modèle doit être assez long pour qu'un tel transport puisse s'établir.



Figure 6-9 : Zone de dépôt d'un modèle fonctionnant avec une granulométrie uniforme.

Cependant, dans la grande majorité des cas, la dune à forte pente reste à l'état embryonnaire. Cela suffit à expliquer des changements de pente locaux, la formation de dépôt de granulométrie resserrée (et correspondant à une extrémité de la courbe granulométrique) ou la séparation de l'écoulement en plusieurs bras.

L'arrêt de l'accroissement de la dune à forte pente se produit généralement par diminution de l'alimentation hydraulique. En effet, il est apparu que la structure est intrinsèquement stable (ou plus exactement qu'elle a tendance à se développer). Ainsi, il a été possible d'observer, sur la plate-forme torrentielle²⁵ une dune d'environ 4 m de long²⁵.

²⁵ Cette structure de très grande taille (environ 350 m en nature) a pu se développer parce que les bords du modèle ont permis la stabilisation des écoulements assez longtemps pour permettre la construction de cette structure. Elle montre cependant que les dunes à forte pente sont capables d'atteindre de très grandes tailles si les conditions favorables sont réunies. Cependant, l'élévation du lit reste limitée à quelques cm (plusieurs mètres en nature), comme si l'augmentation de la longueur de la partie centrale conduisait à une atténuation de ses caractéristiques.

Cette constatation aboutit directement à des indications sur les constructions d'ouvrages de correction. En effet, dans les torrents susceptibles de former des dunes à forte pente, il faut être très prudent avec les ouvrages pouvant fixer l'écoulement durant les périodes de fortes crues comme les digues longitudinales. En effet, il y a alors un risque de voir se développer une dune à forte pente de très grande taille. C'est un phénomène de ce type

Suite de note page suivante...



Figure 6-10 : Dune à forte pente de grande ampleur durant l'essai 10.

6.3.3.4. Bras multiples et dépôts latéraux

La dune à forte pente favorise, dans sa partie aval, la séparation en plusieurs bras. En effet, la formation d'une zone de dépôt de forme conique et de granulométrie très grossière permet d'élargir considérablement l'écoulement (sa hauteur est alors bien inférieure au diamètre des blocs).

Il se forme alors un lit en tresses très complexe. La prochaine dune à forte pente ne pourra se former que lorsque plusieurs bras se regrouperont pour constituer un écoulement assez vigoureux permettant la création d'une nouvelle zone de matériaux fins par enlèvement des matériaux grossiers.

Il faut noter qu'une dune à forte pente, même embryonnaire, suffit à séparer l'écoulement. En effet, le transport d'éléments trop grossiers - par rapport aux conditions d'écoulement globales - dans la partie centrale ne peut se traduire que par un dépôt, un peu en aval, de matériaux grossiers qui s'appuient les uns sur les autres. L'arrêt d'un amas central entraîne la séparation de l'écoulement en plusieurs lits. Il ne s'agit alors que d'un "cône" très sommaire, mais qui suffit à expliquer la formation de

qui avait contraint les ingénieurs de SOGREAH à disposer des épis le long des digues latérales de la plage de dépôt du *Charmaix* (Savoie). En effet, l'écoulement se produisait plutôt le long des digues dans des zones où la perte de charge est plus réduite, conduisant alors à un débit solide très important.

plusieurs bras. Les phénomènes de base restent les mêmes que ceux exposés ci dessus. C'est le cas de la figure suivante :



Figure 6-11 : Séparation de l'écoulement en deux bras durant l'essai 15.

Cependant, le cône de dépôt de la dune à forte pente est particulièrement instable et évolue très rapidement. Il semble qu'il dépend plus des conditions de transport dans la partie centrale que des caractéristiques locales au niveau du dépôt. Ainsi, la distribution des débits connaît de rapides variations. Ces fluctuations contribuent à développer l'instabilité du dessin en plan du lit.

Ainsi, contrairement aux expériences en canal de 60 cm de large, il n'est pas possible de mettre en évidence une forme générale du dessin. D'autre part, les fluctuations sont si rapides qu'on ne peut pas faire l'hypothèse de régime permanent, même sur le plan hydraulique (c'est à dire sur un pas de temps réduit)²⁶.

Les dépôts latéraux sont alors le fruit de ces divagations : ils ne sont pas vraiment créés par une réduction progressive des contraintes hydrauliques locales - suivant le schéma classique - mais découlent plutôt de l'abandon de certaines zones par l'écoulement. Ainsi, ils reproduisent les fluctuations de granulométrie que l'on a déjà décrites, présentant des matériaux plus fins ou plus grossiers que ceux qui sont transportés.

²⁶ Des observations similaires sur des torrents naturels montrent que l'écoulement balaie toute une bande (d'une largeur au moins 10 fois supérieure à celle du lit mineur). Les divagations sont si rapides que cette zone est mouillée en permanence durant les périodes de transport. Le *Boscodon* (Hautes-Alpes) et le *Manival* (Isère) présentent de tels phénomènes lorsque des débits réduits s'écoulent sur des dépôts peu stables. Ces structures seront abordées au paragraphe 7.6.6. sous le terme de "micro charriage hyperconcentré".

D'autre part, comme sur le modèle de 60 cm de large, ils présentent globalement une pénurie en éléments moyens. Ils expliquent ainsi la plus grande fraction d'éléments moyens dans le lit.

Cependant, au gré des divagations du lit, ils sont fréquemment remaniés et leurs particularités morphologiques sont peu à peu gommées. Ce comportement complique nettement l'interprétation que l'on peut faire à la fin d'une crue et explique les difficultés que l'on rencontrera lors des études de terrain (chapitre 7).

6.3.3.5. Structure à déplacement lent (onde à grande échelle)

Il s'agit de phénomènes encore plus difficiles à mettre en évidence que les dunes à forte pente. En effet, il a été possible de noter qu'au cours des essais, un amas de matériaux se déplaçait de l'amont vers l'aval. En fait, ce sont essentiellement les caractéristiques morphologiques du lit dans cette zone qui permettent de suivre cette structure. Elle présente les caractéristiques suivantes :

- surface très étendue (plus d'un m² sur modèle soit 1 ha en nature).
- hauteur relativement faible (quelques cm sur modèle).
- propagation très lente (d'environ un à deux mètres le long du modèle durant une crue type 1970).
- augmentation très marquée du nombre de bras et de la densité des tresses dans cette zone.

Il n'a pas été possible de savoir si une telle structure se développait au cours de la propagation ou si, au contraire, elle s'amortissait. Cette indétermination montre qu'elle présente une certaine stabilité et que - comme pour les dunes à forte pente - le charriage hyperconcentré est incapable de laminier les irrégularités. Cette caractéristique est probablement liée à l'instabilité granulométrique du charriage torrentiel, mais il n'a pas été possible d'établir de lien direct.

ASHMORE (1987) a observé de telles structures sur un modèle réduit présentant les caractéristiques suivantes :

Matériau	d ₅	0.35 mm
	d ₅₀	1.16 mm
	d ₉₅	4 mm
	d ₉₀ / d ₁₀	6.4
Canal	longueur	10 m
	largeur	2 m
	pente	~ 1.5 %

D'autre part, le matériau était recyclé et le débit solide mesuré périodiquement. Il a noté que des "ondes de charriage" se déplaçaient très lentement et présentaient les mêmes caractéristiques que celles décrites ci dessus (augmentation très nette du nombre de bras). D'autre part, il a mesuré que ces structures correspondaient à une augmentation du débit solide. La figure suivante montre les mesures qu'il a réalisées dans ce cas.

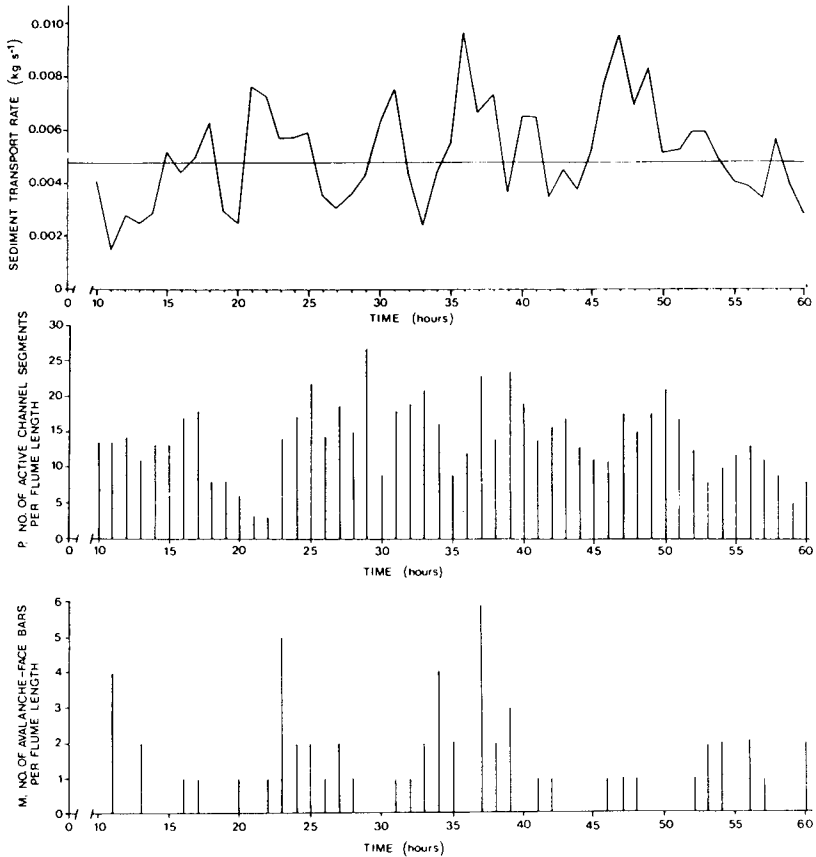


Figure 6-12 : Evolution du débit solide et du nombre de bras en fonction du temps (d'après ASHMORE 1987).

Il décrit ainsi le passage d'une onde de matériaux :

"Avant l'arrivée de l'impulsion de sédiments, le chenal est très bien défini (...). Une heure plus tard, le dessin du chenal est nettement plus complexe. De nouveaux chenaux sont créés par dépôt dans le chenal médian. Le chenal lui même est peu profond et beaucoup moins bien défini (...).

L'impact de la pulsation de transport solide sur la forme du chenal est la suivante :

(a) augmentation des coupures de méandres et du déplacement des chenaux conduisant à un dessin plus complexe.

(b) Augmentation du nombre de seuils migrants²⁷ avec des formes en plan de lobes (...).

(c) Dépôt dans tous les chenaux et renouvellement de la sédimentation."

ASHMORE considère ensuite qu'il s'agit d'un phénomène périodique. Il obtient, par auto corrélation sur les débits solides, une période de quelques heures.

²⁷ Ces seuils migrants correspondent vraisemblablement aux cônes d'éléments grossiers des dunes à forte pente.

Il faut être très prudent vis à vis de ces expériences car les matériaux - donc le débit solide - sont recyclés. Ainsi, une augmentation du débit solide en aval se traduit immédiatement par une injection plus importante en amont. Il semblerait alors que la période mise en évidence correspond plutôt au temps de parcours le long du modèle. On obtient alors une vitesse de propagation d'environ un à deux mètres/heure (4 à 8 heures pour un canal de 10 m de long) ce qui correspond bien aux observations réalisées sur le modèle du *S^t Vincent*.

De telles structures sont très difficiles à suivre et la succession de crues n'a pas permis de quantifier les évolutions rencontrées. Cependant, il s'agit d'un phénomène important car l'arrivée d'une telle structure sur des ouvrages est probablement assez destructrice. Il semble probable qu'une telle structure nécessite une surface étendue pour pouvoir se développer.

6.3.4. Formation de la morphologie finale du lit

Avec les hydrogrammes employés (figures 6-1 & 6-5), lors de la décrue, le débit solide diminue lentement et le lit se fige peu à peu. L'écoulement perd de sa vigueur et les dunes à forte pente ne peuvent plus se former, même à l'état embryonnaire.

Le lit trouve alors une certaine stabilité. En fait, plusieurs lits mineurs existent au plus fort de la crue. Lors de la réduction du débit, le nombre de lits actifs diminue ainsi que leur largeur. Ensuite, l'écoulement continue de se déplacer, mais il ne s'agit que d'un changement de distribution des débits dans des bras déjà existants.

Ainsi, on assiste à une augmentation progressive de la granulométrie du lit. Le phénomène prépondérant dans ce cas est l'érosion, en particulier parce que le débit solide injecté à l'amont est plus faible que dans la branche montante de l'hydrogramme. Il y a donc, globalement, un enfoncement du lit qui contribue à une réduction des divagations. Le dessin du lit n'est donc que faiblement dépendant des conditions hydrauliques en fin de crue. Il s'agit seulement d'une utilisation d'un ancien lit par un écoulement réduit²⁸.

Au dernier palier de la crue, le débit solide injecté est arrêté. Il se forme alors un pavage du lit. Cette étape est décrite au paragraphe 6-4.

Des mesures systématiques de la granulométrie du lit selon quatre transects ont été réalisées à la fin de l'essai 15.

²⁸ En fin de crue l'écoulement n'a plus la puissance nécessaire pour créer un nouveau lit. En effet, on a vu qu'il se formait, pour les forts débits, des dépôts latéraux de blocs. L'écoulement n'est plus capable de déplacer un tel agglomérat. Il peut seulement choisir un lit plutôt qu'un autre parmi ceux formés au cœur de la crue.

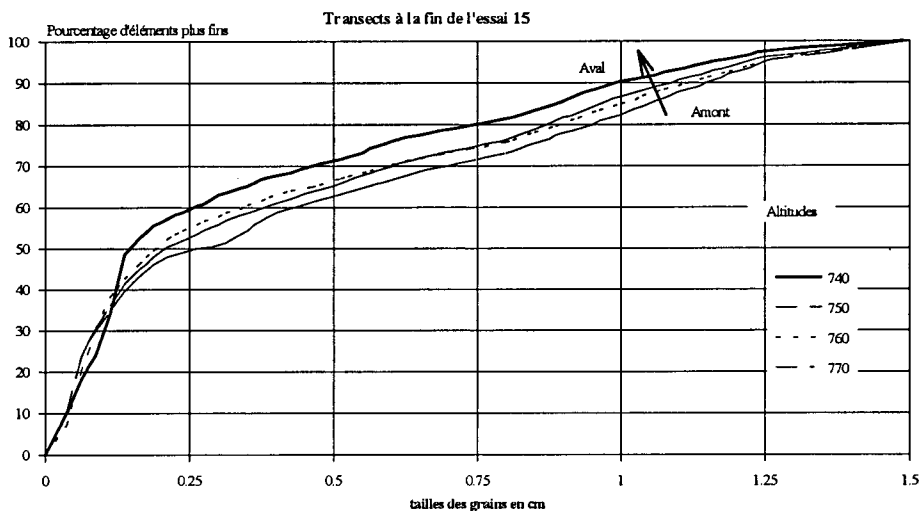


Figure 6-13 : Granulométrie selon quatre transects à la fin de l'essai 15.

Il apparaît un tri granulométrique longitudinal : Il y a un basculement de la courbe granulométrique autour des diamètres de 0.1 à 0.15 cm. Or, il n'a pas été possible de mettre en évidence de variation de pente significative.

Quatre hypothèses peuvent être retenues pour expliquer ce gradient granulométrique :

- La granulométrie injectée est trop grossière par rapport aux conditions hydrauliques, en particulier durant les périodes de faible débit. Le transport solide opère alors un tri granulométrique même sans changement de pente.
- Les phénomènes ne sont plus les mêmes dans la partie amont par rapport à la partie aval. On a vu en effet que les phénomènes tels que les dunes à forte pente nécessitent une certaine distance pour "préparer" le transport solide. Ainsi, la granulométrie du lit, résultat final des différents phénomènes durant la crue, peut être nettement différente suivant la situation longitudinale.
- Une "structure à déplacement lent" est capable de modifier nettement la granulométrie à l'échelle du modèle²⁹. Ainsi, il est possible que cette différence de taille des grains soit causée par une telle structure. Cependant, ce phénomène n'a pas pu être observée à la fin de l'essai 15.
- Une autre possibilité serait que la granulométrie du lit est d'autant plus proche de la granulométrie injectée que les mesures sont faites à l'aval du modèle. La partie amont présente une granulométrie très proche de celle du matériau du lit. Cette particularité - paradoxale *a priori* - s'expliquerait par la répartition des débits solides. En effet, les matériaux ont tendance à se déposer durant la première partie de la crue, plutôt en amont du modèle. Ensuite, avec la relative pénurie de sédiments durant la période des débits décroissants, ces matériaux sont repris de la

²⁹ On verra au chapitre 7 qu'il apparaît effectivement une variation très nette sur le terrain de la granulométrie au niveau de l'extrémité aval d'une telle structure.

partie amont et transportés vers l'aval. On obtient alors la répartition granulométrique mesurée.

En fait, il est difficile de choisir parmi ces hypothèses, d'une part à cause de la faible connaissance que l'on a du charriage torrentiel et d'autre part parce les observations de ce phénomène sont trop limitées³⁰.

Quelle qu'en soit la raison, on peut en conclure que l'essai 15 introduit une dérive non permanente justifiant qu'un essai simulant une crue type 1940 n'ait pas été renouvelé.

6.3.5. Conclusion

L'étude du charriage torrentiel sur un modèle réduit de grande taille (15 m * 3.5 m) a montré que les phénomènes physiques étaient très variables en fonction du temps et de la localisation. Cette diversité semble être causée par l'instabilité granulométrique intrinsèque montrée sur canal étroit. En effet, il se forme des dunes à forte pente, à des stades plus ou moins développés. Elles engendrent un tri granulométrique particulier³¹ :

- les éléments grossiers sont stockés en aval de la structure,
- les éléments fins restent dans la partie centrale de ces dunes,
- les éléments moyens sont les plus facilement transportés et gagnent l'aval du modèle réduit.

De plus, elles favorisent la formation de bras multiples par un élargissement très important de l'écoulement sur le cône de dépôt des éléments grossiers.

Cependant, les divagations de l'écoulement étant très rapides, il est rare qu'une telle structure, malgré sa capacité à se développer, puisse atteindre de très grandes tailles (plusieurs cm de hauteur et quelques mètres de longueur sur un modèle à l'échelle du 1/80°). Il s'agit généralement de phénomènes embryonnaires mais qui ont assez d'influence pour modifier la morphologie et la granulométrie de l'ensemble du cône.

Les "structures à déplacement lent" qui correspondent à des volumes de sédiments très importants (plusieurs dizaines de milliers de m³ en nature) et qui nécessitent la succession de plusieurs crues importantes³² pour transiter le long de la zone de dépôt ont - elles aussi - montré l'incapacité du charriage hyperconcentré à amortir les fluctuations du transport solide. Il semblerait même que le charriage hyperconcentré introduise de telles fluctuations.

³⁰ L'utilisation d'une seule granulométrie rend difficilement quantifiable et généralisable ce type d'approche. Cependant, les observations ont montré que le comportement des classes granulométriques était progressif en fonction de la taille. Or la granulométrie utilisée ici ne comporte pas de lacune, ni d'anomalie particulière. Il est alors légitime de considérer que les tendances observées ici restent valables dans le cas général.

³¹ Il s'agit d'un phénomène limité à la dune à forte pente. En effet, l'ensemble du modèle opère un tri granulométrique qui intègre toutes les particularités des structures morphologiques présentes. Ainsi, sur l'ensemble d'une crue - faibles débits compris, les éléments sont d'autant plus facilement transportés qu'il sont plus fins.

³² Il semblerait - étant donné le temps de retour des crues reproduites sur modèle - qu'une telle structure parcourt les 1500 m de la zone de dépôt en plusieurs siècles. En effet, les crues de faible ampleur semblent incapables d'influencer ces structures, en particulier à cause d'une granulométrie un peu augmentée dans la partie aval où la pente est la plus forte.

La formation du lit après la crue apparaît comme l'adaptation de la superposition de ces structures à un débit nettement plus réduit. Il y a alors une restructuration locale du lit de façon à résister durablement à l'écoulement et à arrêter l'arrachement des grains. Cette formation d'un pavage dans le cadre de ce modèle de grande taille a été abordée en conduisant deux essais spécifiques à la suite de simulation de crue. C'est l'objet du paragraphe suivant.

6.4. Essais de pavage

6.4.1. Objectifs

Ces essais sont destinés à suivre l'évolution de la granulométrie transportée et du débit solide lors de la formation du pavage. Ils ont été réalisés à la suite de simulations de crues. Ils sont donc basés sur une granulométrie et une morphologie mal connues mais probablement assez proches d'une situation réelle.

Le modèle réduit permet de former un pavage "extrême" car correspondant à des conditions très sévères obtenues en appliquant un débit constant et relativement élevé (il ne se produit vraisemblablement que quelques heures par an), durant une longue période. Ce pavage n'est pas forcément plus résistant que s'il était formé par un écoulement plus proche des conditions de début de transport (voir paragraphe 4.10), par contre, il est plus "abouti" car les forts débits liquides impliquent une érosion plus forte et une ségrégation granulométrique plus importante.

Une telle démarche permet de montrer plus facilement l'effet de l'écoulement sur les caractéristiques du lit. Il est donc probable que les pavages "ordinaires" - comme ceux que l'on peut observer en torrent - auront des caractéristiques moins marquées.

D'autre part, ces essais permettent de prendre en considération la disparité des structures morphologiques et les variations de granulométrie. Il s'agit d'une approche globale sur l'ensemble du modèle.

6.4.2. Description des essais

Deux essais ont été réalisés. Le premier - essai P1 - faisait suite à l'essai 15. L'hydrogramme de l'essai est le suivant :

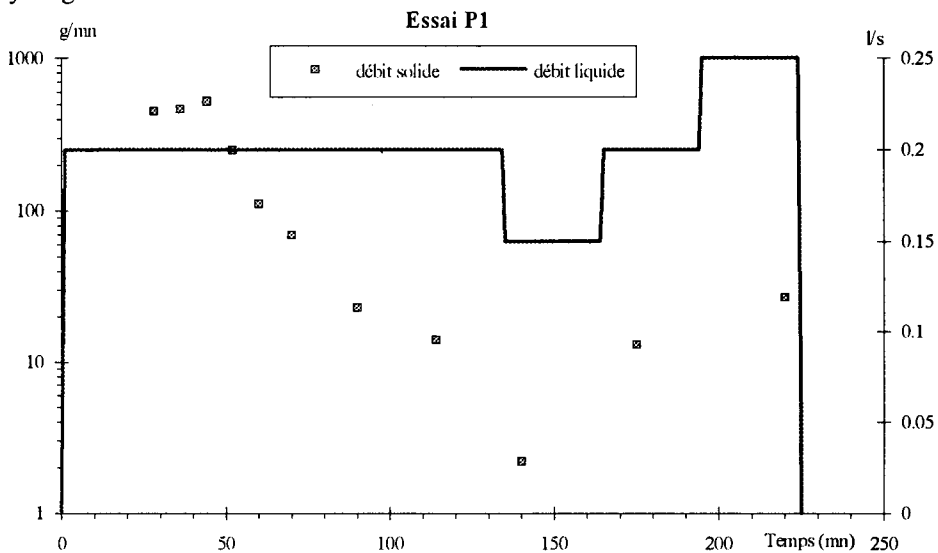


Figure 6-14 : Hydrogramme et sédimentogramme de l'essai P1

Cet essai était essentiellement destiné à tester les méthodes de mesure ainsi qu'à approcher les effets des variations de débit liquide sur le transport solide à proximité du seuil de début de mouvement. Il est apparu que seule la partie correspondant à un débit liquide constant durant une grande période était exploitable.

Ainsi, un second suivi du pavage - P2 - fait suite à l'essai 20. Il s'agit du premier essai pour lequel des ouvrages ont été construits dans le modèle. Cependant, comme durant les essais précédents, le pavage du lit se fait dans le lit mineur, très indépendamment de la configuration générale du modèle.

L'hydrogramme correspondant à l'essai de pavage est le suivant :

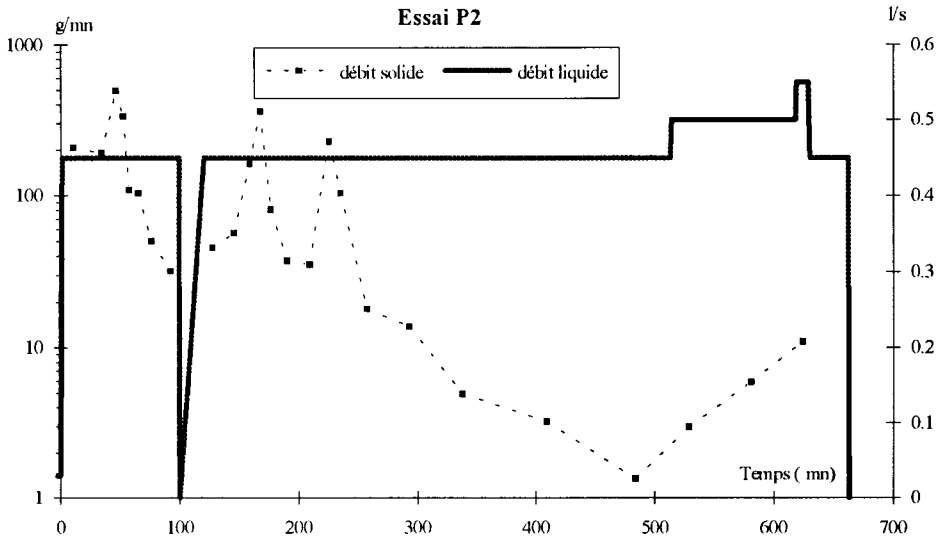


Figure 6-15 : Hydrogramme et sédimentogramme de l'essai P2.

Au bout de 100 mn, il a fallu arrêter l'essai durant toute une nuit. Malgré un redémarrage très lent (augmentation linéaire du débit durant 20 mn), il semble que cette coupure du débit liquide a influencé le transport solide.

En fin d'essai, des débits plus élevés ont été appliqués pour tester la sensibilité du modèle aux variations de débit liquide.

6.4.3. Résultats

Il est difficile de tirer des conclusions définitives de ces deux essais. Cependant, la première remarque concerne l'évolution du débit solide. En effet, il apparaît deux périodes distinctes (surtout dans l'essai P1) :

1. Une phase de débit solide peu variable et relativement élevée (environ 500 g/mn). Il s'agit d'une période pendant laquelle la surface productrice de sédiments est assez étendue pour pouvoir saturer l'écoulement en matériaux solides.
2. Une seconde phase qui correspond à une prise de contrôle du débit solide par la fourniture des grains par le lit. On retrouve donc les mêmes étapes que durant les essais sur modèle réduit. Cette constatation montre que le phénomène de pavage se

produit bien dans le lit mineur, sans influence fondamentale de la morphologie d'ensemble.

Cependant, ces essais présentent quelques particularités par rapport à ceux réalisés dans un canal de deux mètres de long :

- La décroissance du débit solide est beaucoup plus lente (au moins dans un rapport de 1 à 10). Cette différence est de l'ordre des écarts des surfaces du lit mineur. Ainsi, il est possible d'expliquer cette différence uniquement par la taille du modèle.
- Les fluctuations du débit solide en fonction du temps sont plus importantes. On avait déjà observé cette évolution en portant la largeur du canal de 10 à 60 cm. Les fluctuations correspondant à des variations de la morphologie, elles sont d'autant plus importantes que le modèle est plus complexe et que les structures sont plus nombreuses. Ainsi, plus l'on se rapproche de la réalité plus les phénomènes présentent un caractère aléatoire marqué.
- Le mécanisme d'érosion est le même que celui décrit dans le chapitre 4. On avait alors vu qu'une zone du lit ne parvenait à se paver qu'après stabilisation des parties amont et aval. On pouvait alors observer des arrachements qui se produisaient autour de la zone en cours de pavage (ce phénomène est décrit au paragraphe 4.8.5).

Ici, à cause de la diversité des morphologies, les aller-retours de la zone de déstabilisation des matériaux apparaissent beaucoup plus nettement. Par exemple, dans le cas du pavage d'un dépôt grossier de dune à forte pente, l'affouillement débute en aval de la structure (car la granulométrie y est plus fine), puis, par érosion régressive, quelques blocs sont arrachés. Il y a alors mise en mouvement d'une partie des matériaux du dépôt et creusement du lit. Quelques blocs se déposent dans la zone plus fine formant un pavage provisoire. L'érosion est ralentie dans cette zone, mais peu à peu, les blocs - parce qu'ils sont isolés - sont à nouveau arrachés. Les éléments grossiers du dépôt sont de nouveau érodés. Ce processus se répète jusqu'à trouver un équilibre entre pente, granulométrie, débit liquide et structuration du lit.

- Ce modèle de grande longueur fait apparaître une "zone de pavage" qui ne concerne qu'une partie du lit. C'est essentiellement dans cette zone que le pavage se forme, le lit étant pavé en amont, alors que le débit solide en aval est assez important pour y limiter l'érosion. On retrouve alors le schéma de la figure 2.33. Il est cependant difficile de mesurer cette zone car le phénomène du pavage est discontinu dans le temps, mais progressif dans l'espace. Il semble cependant que cette longueur est de l'ordre de 3 à 5 m.
- La différence essentielle est probablement l'absence de changement de la pente globale du lit³³. En effet, entre le lit en fin de période de fort transport solide et celui obtenu lors du pavage, la réduction de pente n'excède pas 0.25 % (il y a moins de 4 cm d'affouillement en amont du modèle).

³³ Cependant, les variations de pente locale sont assez sensibles, mais se produisent dans des sens opposés suivant les zones considérées. Elles ont tendance à gommer les écarts de pente locale engendrés par le charriage hyperconcentré.

Cependant, cette différence ne semble pas entraîner de modification du comportement par rapport aux essais en canal étroit. Cette constatation valide, *a posteriori*, le protocole employé avec le canal de 10 cm de large.

La figure suivante montre un tri granulométrique marqué en fonction du débit solide. Seul le d_{90} est représenté, les autres déciles connaissant des évolutions moins marquées. D'autre part, l'évolution de l'étendue granulométrique en fonction du débit solide est peu sensible.

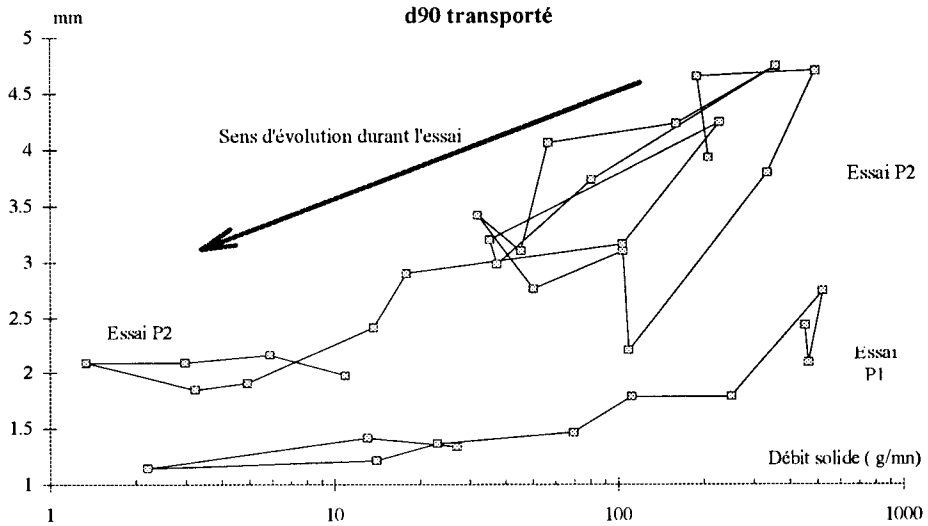


Figure 6-16 : Evolution du d_{90} durant les essais de pavage.

La différence entre les deux essais peut s'expliquer par le caractère artificiel des dépôts auprès des ouvrages³⁴ mais aussi par la durée plus faible de la phase de pavage. Ainsi, l'essai P1 aurait été précédé d'un écoulement réduit pendant une période plus longue.

D'autre part, les granulométries des lit mineur et majeur ont été relevées à la fin de l'essai P1. Elles montrent clairement l'influence du pavage, la courbe se rapprochant d'une droite.

³⁴ En effet, il se produit - durant une crue - un dépôt d'éléments très grossiers au pied des seuils. Le processus est assez semblable à celui que l'on peut observer dans la partie aval des dunes à forte pente. Ces dépôts sont ensuite repris durant le pavage car ils correspondent généralement à une forte pente. Dans le cas de l'aménagement, de tels amas de blocs se trouvent à proximité de l'extrémité aval. Il n'y a alors pas de possibilité d'arrêt des blocs avant la sortie du modèle.

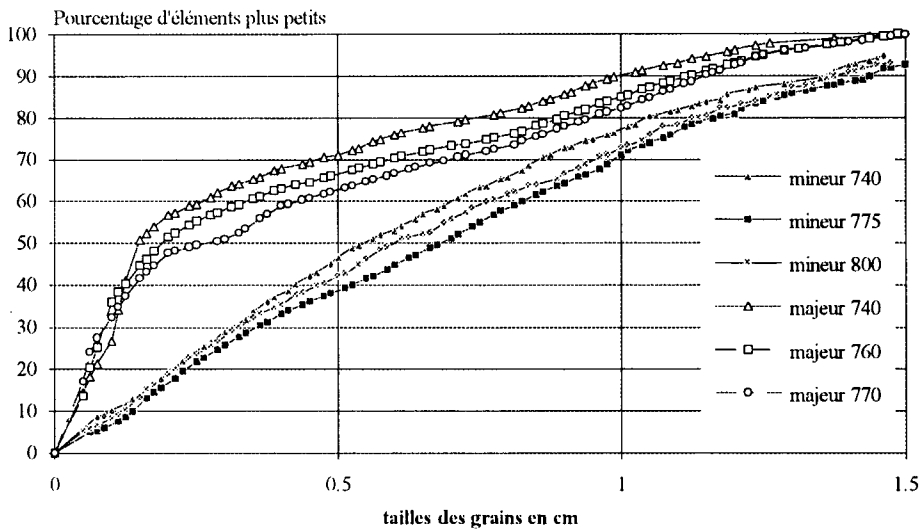


Figure 6-17 : Granulométries comparées des lit mineurs et majeurs à la fin de l'essai P1.

Les deux granulométries apparaissent très différentes. Ainsi, le d_{50} du lit mineur³⁵ est environ quatre fois plus grand que celui du lit majeur³⁶. Les deux familles sont donc nettement distinctes :

- **Le lit mineur** correspond à une répartition très régulière de la taille des grains. Ainsi, les courbes granulométriques (tracées suivant une échelle linéaire) sont très proches de droites. D'autre part, on retrouve l'évolution longitudinale déjà observée pour l'ensemble du lit. Cependant, l'écart entre les courbes se manifeste plutôt pour les éléments de 0.3 à 0.6 cm.
- **Le lit majeur** est plus proche des granulométries de base³⁵ du modèle. Dans ce cas, l'écart entre les courbes correspond plutôt à un changement de représentation des éléments inférieurs à 0.15 cm. Il semble que la courbe obtenue peut se séparer en deux segments de droites. Une première partie correspond aux éléments fins (moins de 0.16 cm) alors que la seconde concerne les éléments grossiers. Seuls les premiers distinguent notablement les courbes le long du modèle.

Cette distinction correspond à celle déjà effectuée dans les chapitres précédents entre les éléments grossiers (qui deviennent de plus en plus nombreux durant les essais) et les éléments moyens et fins. La séparation correspond, là encore, à une valeur un peu supérieure au d_{50} de la granulométrie d'ensemble du modèle³⁶.

³⁵ Le calage du modèle a abouti à l'utilisation de granulométries distinctes pour le lit et pour les matériaux injectés (figure 6-3). On a vu précédemment que les granulométries du lit majeur évoluaient entre ces deux courbes.

³⁶ On se retrouve, une fois encore, à proximité du diamètre moyen.

6.5. Conclusion

Finalement, malgré une morphologie beaucoup plus complexe, les essais sur un modèle de très grande taille se situent dans le prolongement direct de ceux réalisés avec un modèle réduit court (moins de deux mètres) et étroit (10 ou 60 cm).

Les phénomènes observés sur les modèles "ponctuels" (chapitre 4) se produisent encore dans le cas du modèle de grande taille, mais deux aspects semblent expliquer le comportement particulier observé ici :

1. Le tri granulométrique correspondant à un transport des matériaux par nappes de granulométrie resserrée (comme décrit par LISLE - 1990 - par exemple) nécessite une certaine distance pour s'établir. Les évolutions de la granulométrie transportée sont donc plus marquées dans le cas d'un modèle suffisamment long³⁷.
2. Les possibilités de dépôt sélectif permettent à l'écoulement de disposer et de trier les grains avec toute la liberté nécessaire pour développer une morphologie correspondant uniquement au charriage torrentiel.

Ainsi, des structures absentes ou seulement esquissées sur les modèles de taille réduite apparaissent ici. On peut en particulier distinguer les éléments suivants concernant les phases de fort transport solide :

- **Dunes à forte pente** : il s'agit d'éléments morphologiques directement engendrés par l'instabilité granulométrique du charriage hyperconcentré³⁷. Ces structures facilitent les divagations de l'écoulement et se traduisent par des dépôts d'éléments fins et d'éléments grossiers, ainsi que par une rupture de pente sur une échelle de quelques dizaines de mètres.

D'autre part, elles expliquent des variations du niveau du fond de plusieurs mètres indépendamment de caractéristiques extérieures à l'écoulement (rupture de pente, rétrécissement, etc...). Il s'agit probablement de la caractéristique principale des évolutions morphologiques dans le cas du charriage hyperconcentré. Même à l'état embryonnaire, elles permettent d'expliquer la plupart des caractéristiques du charriage hyperconcentré et de la morphologie qui lui est associée.

- **Structures à déplacement lent** : Il s'agit d'ondes à grandes échelles couvrant de très vastes zones (plusieurs mètres de hauteur et plusieurs centaines de mètres de longueur) et qui correspondent à une augmentation locale du transport solide.

Or il apparaît que ces phénomènes ne sont absolument pas amortis par le charriage hyperconcentré mais qu'ils peuvent se déplacer sur de très longues distances. Cependant, la propagation de ces structures est particulièrement lente (environ une centaine de mètres pour une crue plusieurs fois décennale).

D'autres structures plus classiques (méandres, bras multiples, alternances de seuils et de mouilles) ont déjà été décrites dans les chapitres précédents. Il s'agit cependant de phénomènes de taille réduite. Ils ne sont donc pas concernés par le changement de

³⁷ Il est cependant très difficile de donner un ordre de grandeur de cette distance. Il semble - pour la pente, la gamme de débit et la granulométrie employées - que 3 à 4 mètres sont nécessaires lorsque les divagations sont possibles.

taille du modèle et les observations réalisées au chapitre précédent conservent toute leur validité.

Enfin, deux essais de pavage n'ont pas présenté de différence sensible par rapport à ceux conduits en canaux de faible taille. En effet, lorsque le transport solide diminue, les divagations cessent et le phénomène devient monodimensionnel.

Cependant, il apparaît que chaque structure morphologique a un comportement spécifique lors du pavage. Ainsi, les irrégularités - par exemple du débit solide en fonction du temps - sont plus grandes que dans le cas d'un modèle de dimension réduite.

Ainsi, les fluctuations des caractéristiques du charriage torrentiel augmentent avec la complexité du modèle utilisé (taille mais aussi débits solide et liquide). Il faut donc s'attendre à ce que la part de caractéristiques apparemment "aléatoires" soit encore plus importante dans le cadre des relevés de terrain.

Cependant, l'analyse des phénomènes sur ce modèle de grande taille a montré que les mécanismes de base étaient toujours les mêmes que ceux observés sur modèle "ponctuel". Connaissant les mécanismes de base, il semble possible de mettre en évidence les différents processus physiques qui ajoutent de nouvelles évolutions granulométriques par rapport aux approches classiques (tri longitudinal par exemple) et qui troublent la lecture morphologique.

C'est l'objet du chapitre suivant.

6.6. Liste des figures

Figure 6-1 : Hydrogramme reconstitué (à gauche) et hydrogramme utilisé (à droite) pour une crue type 1970 (D'après rapport SOGREAH 1992).....	345
Figure 6-2 : Sédimentogramme du matériau injecté pour une crue type 1970 (D'après rapport SOGREAH 1992).....	345
Figure 6-3 : Granulométries utilisées pour le fonctionnement du modèle après calage.....	349
Figure 6-4 : Plan simplifié des limites du modèle (d'après SOGREAH 1992).	350
Figure 6-5 : Hydrogrammes solide et liquide durant l'essai 15.....	351
Figure 6-6 : Débit solide sortant en fonction du débit liquide injecté dans le modèle.	352
Figure 6-7 : Granulométrie transportée durant le second palier de l'essai 15.....	355
Figure 6-8 : Schéma d'une section longitudinale de dune à forte pente.....	358
Figure 6-9 : Zone de dépôt d'un modèle fonctionnant avec une granulométrie uniforme.....	360
Figure 6-10 : Dune à forte pente de grande ampleur durant l'essai 10.	361
Figure 6-11 : Séparation de l'écoulement en deux bras durant l'essai 15.....	362
Figure 6-12 : Evolution du débit solide et du nombre de bras en fonction du temps (d'après Ashmore 1987).....	364
Figure 6-13 : Granulométrie selon quatre transects à la fin de l'essai 15.	366
Figure 6-14 : Hydrogramme et sédimentogramme de l'essai P1	369
Figure 6-15 : Hydrogramme et sédimentogramme de l'essai P2.	370
Figure 6-16 : Evolution du d90 durant les essais de pavage.	372
Figure 6-17 : Granulométries comparées des lit mineurs et majeurs à la fin de l'essai P1.	373

1 - Introduction - Généralités

2 - Analyse bibliographique

3 - Méthodes de mesure

4 - Effet local d'un écoulement d'eau claire
sur un lit de granulométrie étendue

5 - Passage
d'une modélisation monodimensionnelle
à une approche bidimensionnelle

6 - Analyse des effets des variations temporelles et de l'apport amont
de matériaux sur une zone de dépôt

7 - Analyse de la complexité des lits naturels

Sommaire

7.1. Introduction	380
7.1.1. Objectifs	380
7.1.2. Difficulté de la confrontation Modèle réduit - Terrain.....	381
7.1.3. Risques du regroupement de mesures fragmentaires.....	382
7.1.4. Difficulté de l'approche "naturaliste"	383
7.2. Approche morphologique préliminaire.....	385
7.2.1. Objectifs	385
7.2.2. Zones et Structures morphologiques.....	385
7.2.3. Zones morphologiques	386
7.2.3.1. Zone d'érosion	386
7.2.3.2. Zone de transit.....	386
7.2.3.3. Zone de dépôt.....	387
7.2.4. Structures morphologiques.....	387
7.2.4.1. Dépôt	388
7.2.4.2. Reprise	388
7.2.4.3. Seuil - Mouille.....	388
7.2.4.4. Matériaux remaniés	388
7.3. Mesures réalisées dans le cadre de cette étude	389
7.3.1. Objectifs	389
7.3.2. Méthode employée.....	389
7.3.3. Définition des différents types de zones de mesure géométriques.....	390
7.3.3.1. Transect transversal	390
7.3.3.2. Ligne longitudinale.....	391
7.3.3.3. "Carte granulo - morphologique"	391
7.3.4. Paramètres relevés.....	391
7.3.4.1. Mesures de terrain	391
7.3.4.2. Paramètres calculés.....	392
7.4. Description sommaire des torrents retenus.....	395
7.4.1. Critère de sélection	395
7.4.2. Le St Vincent	396
7.4.2.1. Partie amont.....	396
7.4.2.2. Les gorges	396
7.4.2.3. La zone de dépôt.....	397
7.4.2.4. Chenal d'écoulement à bief affouillable	398
7.4.2.5. Bief aval jusqu'au confluent.....	398
7.4.3. La Béoux	398
7.4.4. Le Rabioux de Châteauroux	399
7.4.5. La Cerveyrette.....	400
7.4.6. L'Infernet	400
7.4.7. Le torrent de Bresson	401
7.4.8. La Malsanne	401

7.4.9. Le torrent de Bonnegarde.....	402
7.4.10. Le Torrent des glaciers	402
7.5. Résultats concernant les zones morphologiques.....	403
7.5.1. Evolution longitudinale.....	403
7.5.1.1. Profil longitudinal	403
7.5.1.2. Variations des caractéristiques granulométriques en fonction du profil en long.....	406
7.5.2. Effet de la pente.....	410
7.5.3. Effet de l'historique des écoulements	413
7.5.3.1. Caractéristiques locales	413
7.5.3.2. Historique à long terme des écoulements à l'échelle du torrent	415
7.5.4. Confrontation avec la granulométrie transportée.....	416
7.5.5. Effet d'un confluent	417
7.6. Résultat concernant les structures morphologiques.....	419
7.6.1. Introduction - Prédominance de la morphologie.....	419
7.6.2. Matériaux remaniés	419
7.6.3. Reprise dans les terrasses de dépôt	424
7.6.4. Structure en marches d'escalier	425
7.6.5. Mode de transport (lave torrentielle ou charriage).....	428
7.6.6. Charriage granulaire hyperconcentré - dunes à forte pente.....	430
7.6.6.1. Micro charriage hyperconcentré	430
7.6.6.2. Morphologie après les fortes crues	434
7.6.7. Carte de granulométrie	436
7.7. Hydrologie	437
7.7.1. Objectifs.....	437
7.7.2. Paramètres retenus.....	437
7.7.3. Corrélations avec les paramètres granulométriques.....	438
7.7.3.1. Approche globale	438
7.7.3.2. Transport en suspension	438
7.7.3.3. Diamètre correspondant à la contrainte critique de cisaillement	439
7.8. Mesures dans le cadre d'une étude de cas	443
7.8.1. Introduction	443
7.8.2. Méthode d'obtention des caractéristiques d'ensemble	443
7.8.3. Méthode d'obtention de granulométries particulières	445
7.8.3.1. Conditions d'écoulement - pertes de charge	445
7.8.3.2. Stabilité du lit.....	445
7.8.3.3. Débit solide.....	445
7.8.4. Conclusion	446
7.9. Conclusion	448
7.10. Liste des figures.....	452

7.1. Introduction

7.1.1. Objectifs

Ce chapitre concerne les liens entre la granulométrie et la morphologie dans le lit de torrents naturels. L'originalité de ce travail réside dans la confrontation de deux moyens d'investigations et de deux approches complémentaires :

1. **La "lecture" morphologique d'un lit torrentiel** : C'est l'analyse classique de l'homme de terrain qui, à partir de l'observation du lit torrentiel, construit des hypothèses sur le fonctionnement du torrent durant les crues.

C'est une étape extrêmement importante car elle sert de base à la réalisation d'ouvrages de protection. C'est d'elle que dépendent généralement l'efficacité des travaux et la pérennité des ouvrages. Cependant, c'est encore un domaine largement empirique et quantitatif et l'absence de connaissances sur la dynamique torrentielle donne tout son poids à l'expérience. La complexité des lits torrentiels et le désordre dans l'agencement des structures morphologiques rendent cette approche très difficile.

2. **L'observation d'un modèle réduit de lit torrentiel** soumis à une crue apporte des enseignements sur la dynamique des phénomènes. Il ne s'agit cependant que d'une modélisation très simplifiée et la souplesse du modèle réduit¹ rend indispensable les relevés de terrain.

La possibilité de reproduire des crues à la demande permet de progresser considérablement dans la connaissance des phénomènes. Enfin, des études de sensibilité permettent de connaître l'influence de chaque paramètre. Les démarches employées dans ce type d'étude ont été largement détaillées dans les chapitres précédents.

Des expérimentations sur modèle réduit ont donc été conduites pour préparer le passage du modèle de laboratoire à l'observation de terrain par une étude des imbrications d'échelle. C'est l'objet des trois chapitres précédents. Cette démarche a permis de mettre en évidence les aspects suivants :

- Le charriage a tendance à étaler la courbe granulométrique des matériaux en place en resserrant celle des matériaux transportés : les différentes structures morphologiques contribuant à stocker les tailles extrêmes, les éléments moyens étant les plus facilement transportés.
- Il est apparu deux phénomènes physiques très différents liés au charriage torrentiel suivant que le transport solide est commandé par les conditions hydrauliques ou par l'arrachement des grains du lit.

¹ On a vu au chapitre 6 que de nombreux paramètres sont réglables sur modèle. **Dans une certaine mesure**, celui-ci n'est que le reflet des hypothèses et des *a priori* que l'on a sur le fonctionnement d'un torrent. Cette caractéristique - négligeable dans le cadre d'études d'aménagement où seules les crues importantes sont prises en considération - devient notable lorsque l'on considère des écoulements réduits ou la dynamique sur de longues périodes. Dans ce cas, il est indispensable d'avoir un point de départ aussi fiable que possible.

- Cette différence se traduit par une bi stabilité¹ du tri granulométrique, le torrent passant d'un fonctionnement à l'autre de façon intrinsèquement irréversible. Il en découle une très forte hétérogénéité spatiale des phénomènes, et temporelle des caractéristiques locales (débit solide, granulométrie transportée, niveau du lit...).
- Cette instabilité se traduit par la formation de dunes à forte pente² lorsque le charriage est hyperconcentré et que les conditions favorables d'apparition sont réunies (voir chapitre 6).

Des mesures systématiques ont été réalisées sur une dizaine de torrents pour lesquels seul le charriage influence la morphologie. Elles ont été complétées par l'étude de la dynamique d'une centaine d'autres torrents, aux influences plus complexes, au fonctionnement moins épuré, ainsi que par l'observation des principales rivières torrentielles des Alpes.

Il a ainsi été possible de mettre en lumière des "règles" de fonctionnement, même si ces observations sont extrêmement sommaires et fragmentaires par rapport à la diversité naturelle.

Dans une première étape, nous allons nous interroger sur la validité des confrontations des observations sur modèle avec celles réalisées sur le terrain.

7.1.2. Difficulté de la confrontation Modèle réduit - Terrain

La validité des observations sur modèle est une question aussi vieille que le modèle réduit lui même. Cette question est généralement abordée en s'intéressant à la similitude des phénomènes hydrauliques. Cet aspect, classique de l'hydraulique, a déjà été abordé au chapitre 3. Les particularités des torrents et la nécessité de s'intéresser au transport solide ont été considérées au chapitre 6, par le biais du réglage d'un modèle industriel.

C'est un autre aspect qui est abordé ici : observe-t-on les mêmes phénomènes lorsque l'on considère un modèle à l'échelle du 1/100^o et lorsque l'on parcourt un lit torrentiel? En effet, cette question a peu d'intérêt lorsque l'on considère des paramètres globaux comme les débits liquide ou solide. Mais elle prend une importance considérable dans l'étude de la morphologie.

On a vu, durant les études sur modèle réduit, que suivant les échelles d'observations et la taille des modèles, des phénomènes différents étaient mis en valeur².

Or, l'observation sur un modèle réduit correspond à celle que l'on ferait en nature en planant à 150 m du sol et sans aucune végétation. Les observations de structures morphologiques sont alors très différentes de celles qu'on peut faire en escaladant des blocs dans le lit. Le paragraphe 3.4 illustre l'écart qui peut apparaître lors des mesures

¹ Ce signe signale les termes définis dans le glossaire.

² Tous les phénomènes sont présents à chaque échelle. Cependant, leur importance relative et le résultat diffèrent très sensiblement d'un cas à l'autre.

de terrain suivant l'échelle que l'on considère (la comparaison avait été réalisée sur un paramètre particulièrement simple : la pente).

Ainsi, le passage du modèle réduit à la nature présente deux difficultés :

- La multiplication des paramètres influençant le torrent naturel explique une complexité de la morphologie très supérieure à celle observable sur modèle;
- Le changement d'échelle impose d'étudier des échelles morphologiques très différentes et donc des phénomènes physiques distincts. C'est sans doute la difficulté majeure de cette démarche.

7.1.3. Risques du regroupement de mesures fragmentaires

Au contraire des expérimentations sur modèle réduit, les observations de terrain ne permettent pas de faire varier à volonté les paramètres des zones étudiées. Par exemple, s'il est possible de faire varier indépendamment et continûment la pente d'un modèle réduit, cette évolution sur le terrain ne peut être réalisée qu'en changeant de torrent.

Or, non seulement le passage d'un torrent à l'autre change l'ensemble des paramètres (pente, superficie du bassin versant, quantité et granulométrie des matériaux fournis, hydrologie, etc...), mais cette évolution n'est pas totalement aléatoire, et - pour garder l'exemple de la pente³ - son augmentation est liée à une diminution de la surface du bassin versant comme le montre la figure ci dessous qui regroupe les différentes mesures effectuées sur chaque torrent :

³ On considère ici la pente "visible", c'est à dire sur quelques dizaines de mètres, comme elle a été définie au paragraphe 3.4.2. C'est un résultat de la dynamique torrentielle, mais elle correspond à une trop faible distance pour en être un "moteur".

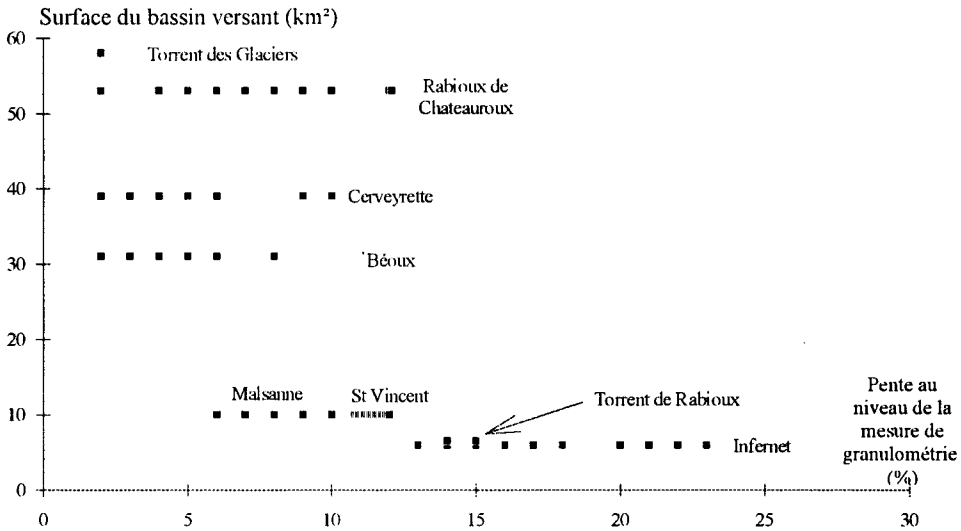


Figure 7-1 : Rapport entre la pente et la surface du bassin versant dans les zones de mesure des torrents concernés.

On risque donc toujours, dès que l'on regroupe les observations sur différents torrents d'aboutir à une interprétation erronée dans la mesure où, en croyant isoler un paramètre, on étudie en fait l'influence d'un autre qui lui est particulièrement lié.

Par exemple, si l'on étudiait le volume de matériaux transportés en une année en fonction de la pente on risquerait d'aboutir à la conclusion suivante : *"le volume transporté est d'autant plus important que la pente est faible"* alors que la bonne interprétation serait plutôt : *"le volume transporté est d'autant plus important que la superficie du bassin versant (et donc les volumes liquides) sont importants"*.

De plus, on risque d'appliquer à un torrent une analyse pertinente pour un groupement de torrents mais pas pour un torrent particulier.

Ainsi, il ne faut pas regrouper hâtivement des observations réalisées sur des sites très différents sans faire d'abord une analyse pour chaque site, en la confirmant ensuite par une approche plus globale.

C'est le travail qui a été réalisé ici, où chaque torrent a d'abord fait l'objet d'une interprétation indépendante. Ensuite seulement, une approche globale a été réalisée à partir des approches de chaque torrent".

Seul ce travail de synthèse est présenté ici.

7.1.4. Difficulté de l'approche "naturaliste"

La démarche scientifique classique consiste à observer un phénomène, puis, à en tirer des règles de fonctionnement puis des conclusions sur la nature du phénomène physique intervenant.

Cependant, cette démarche n'est plus possible face à la complexité des lits torrentiels. Dans ce cas, à partir d'observations fragmentaires et "brouillées", on essaie dégager une tendance que l'on peut relier à un fonctionnement physique. Ensuite, cette hypothèse doit être confirmée à partir d'un faisceau d'indices... et d'explications des mesures ne correspondant pas à ces tendances. Cette confirmation est évidemment indispensable pour valider les hypothèses formulées et les généraliser.

Ainsi, la démarche suivante est conduite dans ce paragraphe : une hypothèse est d'abord formulée, puis elle est confrontée aux observations réalisées. C'est évidemment une situation inconfortable car les confirmations sont souvent hasardeuses et parfois hypothétiques. On entre alors dans un domaine où l'expérience prédomine avec tous les inconvénients correspondant. Dans ce cas, il ne peut être tiré de conclusions définitives mais seulement des tendances.

7.2. Approche morphologique préliminaire

7.2.1. Objectifs

Avant de réaliser des mesures de granulométrie et de morphologie sur un torrent, il est nécessaire d'identifier les zones constituant le lit et contribuant à la dynamique du torrent. Ainsi, il faut déterminer les phénomènes (hydraulique et transport solide) correspondant à chaque secteur. La démarche employée, en considérant d'abord les phénomènes à l'échelle du bassin versant, permet de classer chaque secteur morphologique et d'y rattacher un comportement du torrent.

Evidemment, la définition de ces différents éléments est très dépendante des mesures réalisées et de la démarche suivie. On approche là une difficulté propre à ce type de travail : les interactions entre lecture morphologique et mesure de terrain sont trop importantes pour considérer l'une sans l'autre.

7.2.2. Zones et Structures morphologiques

Il est nécessaire de distinguer deux échelles d'élément morphologique dans le lit d'un torrent. En effet, celui-ci est soumis à des sollicitations très variables et il faut isoler la zone morphologique qui traduit les évolutions à long terme indépendamment des particularités locales des éléments constituant le lit. On a donc défini

- **Les zones morphologiques** correspondent à de vastes surfaces et contribuent à modifier sensiblement le transport solide (débit et granulométrie). Elles constituent des éléments de la dynamique d'ensemble du torrent. C'est, par exemple, l'ensemble de la zone modélisée lors de l'étude de la plage de dépôt du St Vincent (chapitre 6).
- **Les structures morphologiques** - au contraire - sont largement indépendantes des évolutions d'ensemble du lit. Elles forment les éléments indispensables à la construction du lit torrentiel. Elles ont été étudiées sur le modèle de 2 m × 0.6 m (chapitre 5).

Le tableau ci-dessous reprend les différents éléments retenus :

Zones morphologiques	Structures morphologiques
<i>Erosion</i>	<i>Reprise</i>
<i>Transit</i>	<i>Dépôt</i>
<i>Dépôt</i>	<i>Mouille</i>
	<i>Seuil</i>
	<i>Matériau Remanié</i>

Le nombre de types d'éléments morphologiques a volontairement été réduit. Il serait facile, en effet, d'établir une liste beaucoup plus longue, tellement la diversité naturelle est importante. Cependant, la lecture morphologique est encore beaucoup trop sommaire pour pouvoir réaliser des distinctions à la fois fines et fiables. La démarche suivie préfère une lecture grossière mais significative.

Des indications permettant de distinguer ces différents éléments sont exposées dans la suite de ce paragraphe. S'y ajoute une description des mesures réalisées indépendamment de la morphologie comme les transects transversaux.

Il faut noter que certains éléments ne sont pas pris en considération ici. C'est le cas par exemple des rapides⁴ qui sont mis en évidence lors de l'interprétation plutôt qu'observés lors des mesures. En effet, la détection sur le terrain des éléments morphologiques d'une taille de plusieurs dizaines (ou plusieurs centaines) de mètres est difficile.

7.2.3. Zones morphologiques

7.2.3.1. Zone d'érosion

Il s'agit des zones pour lesquelles le phénomène largement prépondérant est l'érosion. Généralement, elles correspondent à un processus d'alimentation en matériaux depuis les versants : glissement de terrain, éboulement, apport d'un affluent...

Il peut aussi se présenter le cas d'un volume très important de matériaux disponibles (souvent, il s'agit d'une moraine) dans lequel le torrent peut puiser sans limitation à court terme.

Ces zones se caractérisent par des versants instables, une forte pente du torrent et des structures morphologiques peu développées⁴. Elles permettent généralement d'avoir une bonne idée de l'activité du torrent en cernant la quantité et les caractéristiques des éléments transportés.

En effet, sous réserve que le tri et l'usure soient négligeables, la granulométrie de ces zones d'apports est celle qui est transportée par le torrent sur une longue période.

Cependant, les zones d'alimentation en matériaux sont généralement étendues et hétérogènes. Il n'est alors plus possible de connaître par ce biais les caractéristiques des matériaux transportés par l'écoulement.

7.2.3.2. Zone de transit

On distingue deux sortes de zones de transit :

- Les zones pour lesquelles **les influences extérieures stabilisent le lit** (fond rocheux, éboulement, etc...). L'érosion y est alors impossible malgré une très forte pente. Des mesures y sont sans intérêt car le lit n'est que très partiellement le résultat des phénomènes hydrauliques.
- Les zones où **les caractéristiques du chenal correspondent à la capacité de transport** nécessaire au transit des matériaux venant de l'amont. Dans ce cas, le transport solide étant à l'équilibre, il n'y a - globalement - ni érosion ni dépôt. De

⁴ En effet, l'érosion est généralement sélective et de très gros blocs forment le fond du lit sans être déplacés ou structurés par l'écoulement. De plus, les apports des versants qui se sont produits depuis la dernière crue s'ajoutent à cette zone peu structurée et en accroissent encore le désordre.

Cependant, si les apports tarissent - il ne s'agit plus d'une zone d'érosion - la succession de crues parvient à structurer une telle zone et à former un pavage d'autant plus résistant que les apports contenaient des éléments très grossiers.

nombreux torrents à lave présentent cette caractéristique. Elle semble beaucoup plus rare lorsque le phénomène de charriage est prépondérant, indiquant ainsi de fortes variations du transport solide. Il peut y avoir alors une respiration importante pendant les crues.

Ces zones sont cependant difficiles à étudier car les échanges globaux de matériaux avec l'écoulement sont très limités à chaque crue par définition. Ainsi, le lit apparaît comme le résultat de la succession de nombreuses crues souvent différentes. L'interprétation est difficile, et deux mesures voisines sont souvent incohérentes (parce que correspondant à des conditions hydrauliques^d très différentes).

Finalement, les mesures dans des zones de transit ont été assez rares, et seules quelques dépôts localisés ont été considérés. En effet, il est souvent possible de faire l'hypothèse que ces dépôts correspondent à un arrêt brutal des matériaux (par exemple lorsque l'écoulement quitte le lit mineur) et correspondent bien à la granulométrie transportée au moment de ce dépôt.

7.2.3.3. Zone de dépôt

Il s'agit d'une zone où la tendance générale est le dépôt. Elle correspond à une rupture de pente engendrée par une disposition générale du relief (transition entre le flanc de montagne et la plaine) ou une particularité locale située en aval (seuil rocheux, fort rétrécissement ou encore arrivée de matériaux : éboulement, glissement de terrain ou torrent affluent).

Généralement, le dépôt des matériaux n'est que partiel et correspond à des phénomènes complexes de dépôt - reprise. L'étude locale de la granulométrie et de la morphologie y est donc difficile. Cependant, plus le phénomène de dépôt est marqué, plus l'étude est facile car les effets des crues anciennes sont alors rapidement gommés.

Du point de vue des études d'ingénierie, ces zones de dépôt sont particulièrement importantes car elles renseignent sur les volumes transportés et sur l'âge⁵ des phénomènes correspondant à la configuration actuelle.

7.2.4. Structures morphologiques

Il s'agit là de décrire les structures de base du lit. L'objectif de ce paragraphe est d'apporter assez d'indices pour les distinguer et pouvoir en faire une mesure granulométrique. Dans une seconde étape, il sera possible d'interpréter ces mesures et de confirmer des hypothèses sur la formation d'un lit torrentiel.

7.2.4.1. Dépôt

Il s'agit d'une structure de quelques dizaines de mètres carrés qui correspond à un dépôt par l'écoulement des matériaux dont il était chargé. Deux cas de figure se présentent :

⁵ En effet, suivant "l'état d'avancement" de la formation d'une zone de dépôt, il est possible d'avoir une idée des volumes transportés et déposés depuis cette disposition du torrent. Il est possible de déterminer si la zone de dépôt est plus ou moins proche d'un état asymptotique d'équilibre.

- Le dépôt très bref durant une crue. Il est souvent associé à un changement de direction de l'écoulement. Dans ce cas, le tri granulométrique lors du dépôt est faible.
- Le dépôt dans des zones de moindre contrainte hydraulique. Il s'agit d'un phénomène très lent, presque continu (LISLE & HILTON 1992). C'est le cas, par exemple, des dépôts latéraux et des mouilles. Le tri granulométrique est très important et le dépôt est constitué uniquement d'éléments fins.

7.2.4.2. Reprise

Il s'agit de surfaces où l'écoulement a érodé des matériaux. Il peut s'agir d'une érosion généralisée (comme, par exemple, le bas d'un glissement de terrain). Elle se caractérise habituellement par un enfoncement du lit, des berges instables et un lit peu structuré.

Dans certains cas, la reprise est seulement temporaire et correspond - par exemple - à un phénomène de divagation. On peut donc rencontrer des structures de reprise dans des zones de dépôts.

Il est possible, en s'intéressant aux talus non structurés par l'écoulement de mesurer la granulométrie d'ensemble⁶ du lit⁶.

7.2.4.3. Seuil - Mouille

Ces deux termes ont déjà été décrits au cours de l'étude bibliographique dans le paragraphe 2.7.8 et dans le glossaire.

7.2.4.4. Matériaux remaniés

Il s'agit de surfaces où le matériau a été remanié, généralement par intervention humaine. Les mesures sont alors inutiles pour obtenir des renseignements directs sur la dynamique torrentielle, par contre, elles permettent de mieux connaître la granulométrie d'ensemble du lit, au moins au niveau du site de mesure.

⁶ La connaissance de cette granulométrie est essentielle pour de nombreuses études (et en particulier pour l'utilisation d'un modèle réduit). Or, ce paramètre est très difficile à mesurer sur le terrain. En effet, les matériaux sont toujours disposés par l'écoulement. Sauf exception, il se produit un tri granulométrique, soit au cours du dépôt, soit par lessivage du lit dans une phase ultérieure. Ainsi, la surface du lit présente toujours une granulométrie très différente de celle de l'ensemble des matériaux. La granulométrie d'ensemble est alors camouflée par le phénomène de pavage.

7.3. Mesures réalisées dans le cadre de cette étude

7.3.1. Objectifs

Ces mesures sont destinées à comprendre les mécanismes aboutissant à la formation d'un lit torrentiel pour faciliter et étayer l'interprétation des phénomènes à partir d'observations. Elles doivent donc être basées sur une double analyse de la granulométrie (plutôt reliée aux conditions hydrauliques) et de la morphologie.

Ces deux aspects ont donc été considérés simultanément, la démarche suivie consistant à réaliser une lecture morphologique, puis à effectuer une mesure de la granulométrie. Durant une étape préliminaire, différentes mesures ont été réalisées, mais faute de standardisation, elles n'ont pas pu être facilement utilisées. Il a donc été nécessaire de définir un protocole systématique des mesures de terrain afin de rendre les observations comparables d'un site à l'autre mais aussi d'un torrent à l'autre. L'essentiel de ce travail de définition de la méthode de mesure (et de l'incertitude qui y est attachée) a été traité au chapitre 3. On ne considère ici que les mesures systématiques effectuées en suivant ce protocole.

Cependant, la lecture morphologique est réellement difficile et on verra au paragraphe 7.3.3 que des mesures ont été réalisées indépendamment de la morphologie, dans l'espoir d'obtenir des paramètres granulométriques facilement utilisables. Cependant de telles mesures ne peuvent apporter que peu d'informations sur la dynamique torrentielle.

7.3.2. Méthode employée

La démarche retenue lors de la mesure de caractéristiques sur un torrent est donc la suivante :

- 1 **caractérisation du fonctionnement d'ensemble du torrent** (à l'échelle du bassin versant). C'est une étape indispensable. Conduite de façon sommaire, elle permet de distinguer les zones d'érosion des zones de dépôt et de connaître l'évolution à très long terme du torrent et de son profil en long. Conduite plus finement, elle permet de cerner la disponibilité en matériaux et de savoir - par exemple - si le torrent est capable de générer des crues d'eau claire⁷. Un autre aspect de cette démarche consiste à estimer le fonctionnement des affluents et leur contribution - quantitative mais surtout qualitative⁸ - au transport solide. Enfin, l'étude de la confluence avec la rivière principale est souvent riche d'enseignements.

⁷ La crue d'eau claire correspond à un débit solide très inférieur à la capacité de transport de l'écoulement. C'est le cas lorsque l'ensemble du lit est fortement pavé et qu'il n'y a pas de zone d'érosion caractéristique. La crue d'eau claire est extrêmement affouillante lorsque l'arrachement des grains est possible, et le transport solide se rapproche alors des conditions d'équilibre.

⁸ Il est très important de connaître la nature et la taille des matériaux transportés par un affluent. En effet, un torrent apportant de grandes quantités d'éléments fins sera généralement moins influent que celui qui transporte de gros blocs lors de l'écoulement de laves torrentielles. La comparaison de l'*Uhaye* (Hautes-Alpes), au confluent du *Riou Bourdou* et de l'*Abéous* en est un exemple éclatant.

- 2 **détermination des conditions durant les crues et du mode de transport habituel du torrent** à partir d'une étude du chenal d'écoulement. Il est essentiel de cerner l'occurrence de laves torrentielles dans une étude concernant la morphologie. En effet, les laves présentent des capacités de transport supérieures à celle du charriage. Leur influence est donc très importante sur la morphologie.
- 3 **Etablissement de scénarios de fonctionnement du torrent.** Cette approche concerne les phénomènes se déroulant à l'échelle de quelques heures. C'est dans ce cadre que les particularités géométriques du lit majeur⁹ sont prises en considération. C'est ici que les différentes zones morphologiques sont identifiées.
- 4 **Détermination des principales structures morphologiques.** De plus, des secteurs représentatifs du matériau de l'ensemble du lit sont déterminés.
- 5 **Mesure des différents paramètres.**

7.3.3. Définition des différents types de zones de mesure géométriques

Indépendamment de la morphologie, il a semblé nécessaire d'effectuer des mesures systématiques dans l'espoir de dégager des liens entre une granulométrie mesurée sans subjectivité et le comportement du torrent. En effet, une mesure systématique de granulométrie le long de transects régulièrement espacés permettant d'obtenir une granulométrie représentative est bien préférable car elle permet d'éviter la difficile interprétation morphologique. Ainsi, trois types de relevés systématiques ont été conduits pour obtenir une granulométrie représentative de l'ensemble du lit.

Dans ce cas, plutôt que d'effectuer la mesure suivant des critères morphologiques, elle est basée sur des considérations géométriques.

7.3.3.1. Transect transversal

Il s'agit de mesures le long d'un transect barrant le lit perpendiculairement à l'écoulement. L'échantillon comprend alors des éléments de chaque partie du lit. Le seul caractère arbitraire concerne la position longitudinale du transect et la largeur de la mesure dans le lit. En effet, le pas de prélèvement est directement obtenu en divisant la largeur par cent⁹.

Le choix de l'altitude de mesure est par contre beaucoup plus difficile car il s'agit d'éviter de prendre en considération une morphologie particulière (en particulier dans le cas d'une structure en marches d'escalier). D'autre part, il apparaît généralement une évolution longitudinale de la granulométrie. Ce problème peut être - partiellement - résolu en effectuant une série de mesures régulièrement espacées sur la zone étudiée.

Le choix de la largeur de mesure est moins influent. On distingue en général un lit mineur⁹ actif, dans un lit majeur⁹ nettement plus large. Celui ci est constitué de terrasses de dépôt et - éventuellement - de bras morts. Ne mesurer qu'une partie du lit revient à pondérer différemment l'importance des lits mineurs (actifs ou non) et des terrasses de dépôt.

⁹ On a vu en effet au paragraphe 3.2.4 que l'on obtenait un bon compromis du rapport précision / durée de la mesure en prélevant une centaine d'éléments.

Finalement, sauf s'il traverse une structure longitudinale particulière, le transect présente une bonne image de la granulométrie locale de la surface du lit.

7.3.3.2. Ligne longitudinale

La ligne longitudinale est identique au transect transversal mais la mesure est réalisée en considérant un prélèvement suivant l'axe (éventuellement curviligne) du torrent. Les problèmes de représentativité sont les mêmes, mais les structures influentes sont alors orientées longitudinalement.

Il est alors possible de mesurer uniquement un dépôt ou le lit mineur, ou un bras mort. En effet, les structures morphologiques sont préférentiellement orientées suivant l'axe du courant qui les a formées. Ainsi, ce type de mesure est beaucoup plus difficile à réaliser de façon objective que la mesure transversale.

On choisira donc une mesure transversale ou longitudinale suivant l'objectif.

7.3.3.3. "Carte granulo - morphologique"

Afin de pouvoir suivre l'évolution locale de la granulométrie, indépendamment du choix de la méthode de mesure, des relevés systématiques ont été réalisés : il s'agit de mesurer tous les grains se trouvant aux intersections d'un quadrillage de taille réduite. Cette méthode permet d'éviter le choix arbitraire de la zone de mesure (à l'intérieur du quadrillage).

D'autre part, elle a mis en évidence que les résultats obtenus à l'échelle du torrent sont encore valables sur une zone beaucoup plus réduite : les mêmes phénomènes apparaissent donc à des échelles différentes.

Cette démarche est détaillée à l'annexe VI.

7.3.4. Paramètres relevés

7.3.4.1. Mesures de terrain

Sur chacune des zones de mesures sélectionnées, il a été possible de réaliser les opérations suivantes :

- **détermination de la granulométrie** en mesurant le diamètre intermédiaire d'une centaine de grains prélevés à intervalle fixe dans une zone considérée comme homogène (cette méthode a été détaillée au chapitre 3).
- **mesure de la pente** sur une distance de quelques dizaines de mètres¹⁰. Les pentes en amont et en aval de la zone de mesure ont été mesurées indépendamment.
- **prise en considération de l'historique local des écoulements**. Ainsi, un indice de lavage a été attribué à chaque zone. Il s'agit d'un chiffre d'autant plus élevé que les écoulements ont remanié avec vigueur la zone concernée. Cependant, le choix de ce coefficient étant totalement arbitraire, il correspond seulement à un moyen de vérifier les liens existant entre des paramètres quantitatifs et une impression

¹⁰ Il s'agit donc de la pente "visible" comme exposé au paragraphe 3.4.2.

subjective¹¹. Ce coefficient n'est donc pas utilisé de façon quantitative mais seulement pour mettre en évidence une tendance.

- **relevé de la morphologie** interprétée et du "rôle" de la structure considérée dans la dynamique du torrent. Ce dernier point est évidemment le plus difficile.

7.3.4.2. Paramètres calculés

La répartition granulométrique est représentée par une courbe. C'est donc une grandeur difficilement utilisable directement. Deux démarches en simplifient l'approche :

- **L'utilisation d'un ou de plusieurs diamètres représentatifs.** Le choix de ces diamètres est arbitraire et très dépendant du phénomène étudié. On retient généralement les déciles suivants : d_{30} , d_{50} , d_{90} . On utilise aussi, en rapport avec la loi de distribution normale, les valeurs d_{16} et d_{84} . Enfin, le diamètre moyen d_m est fréquemment utilisé car il semble plus représentatif que le d_{50} de la mobilité d'ensemble des grains d'une granulométrie étendue.
- **L'ajustement d'une loi de distribution.** Cette démarche présente deux avantages : elle permet de limiter le nombre de paramètres et facilite considérablement les approches théoriques. Cependant, il est nécessaire de pouvoir réaliser un ajustement satisfaisant et donc de bien choisir la loi servant au calage.

A partir de l'observation des courbes granulométriques des tentatives d'ajustements ont été réalisées. Il est apparu nécessaire de définir une loi à trois paramètres pour pouvoir réaliser un calage satisfaisant sur l'ensemble des courbes granulométriques :

- ⇒ **moyenne et écart type d'une répartition Log - normale** ajustée sur les grains de plus de 1 cm de diamètres
- ⇒ **"excédent en fines"** correspondant à la différence entre le pourcentage d'éléments de moins de 1 cm mesuré et celui calculé par la loi Log - normale ajustée.

La figure suivante illustre cette démarche :

¹¹ En effet, il a été impossible de définir de règles pouvant conduire à une détermination objective de cet indice. Il ne présente donc qu'une valeur relative de comparaison d'une zone à l'autre, et seulement dans la mesure où il a été déterminé par le même opérateur.

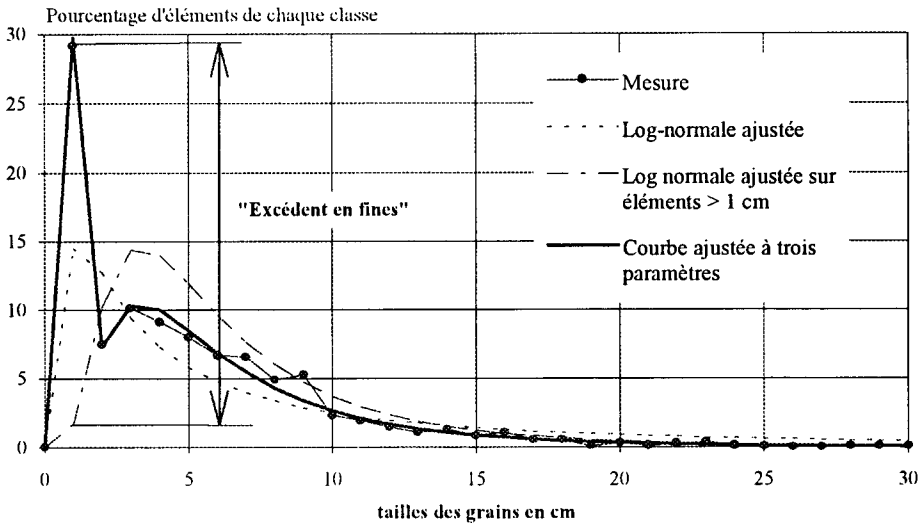


Figure 7-2 : Principe de l'ajustement d'une loi à trois paramètres sur une courbe granulométrique du *Torrent des Glaciers*.

La démarche employée pour effectuer cet ajustement est exposée à l'annexe IV.

Cependant, il est apparu que cette méthode - séduisante *a priori* - n'apportait pas d'éléments nouveaux à travers l'utilisation de la moyenne et de l'écart type d'ajustement lors de l'interprétation par rapport à l'utilisation judicieuse de certains déciles¹². D'autre part, il n'est pas possible d'effectuer un ajustement satisfaisant des courbes granulométriques de certaines morphologies comme les seuils dont les courbes ont une forme très spécifique.

Par contre, dans certains cas, l'**excédent en fines** permet d'expliquer certaines tendances nettement plus facilement que les déciles. En effet, il semble, que ce paramètre concerne les éléments transportés en suspension.

On explique facilement qu'à partir d'une certaine taille, le charriage soit le seul phénomène capable de transporter les grains. On a vu aussi qu'il n'y avait jamais - ni à partir des mesures de terrain, ni à l'issue des essais sur modèle réduit - de coupure brutale de la courbe granulométrique. Il est donc probable que le charriage soit aussi responsable d'une part du transport d'éléments fins¹³.

¹² Il faut cependant noter que certaines tendances apparaissent plus nettement à partir de ces paramètres d'ajustement.

¹³ Le calcul effectué, dépendant de l'ensemble de la courbe granulométrique, conduit, pour une même fraction d'éléments de moins de 1 cm, à ce que la part d'excédent en fines soit d'autant plus importante que le charriage transporte des éléments plus grossiers. Ce résultat est conforme à la conception que l'on a de ces phénomènes.

Cependant, une part des matériaux fins - complémentaire - est susceptible d'être transporté en suspension par l'écoulement¹⁴. **Ainsi, l'excédent en fines semble être directement lié au transport en suspension dans le torrent.**

Ce paramètre sera donc utilisé quelquefois dans le cadre de ce travail, même si les difficultés de ce calcul en limitent considérablement l'application. Son comportement en fonction de l'évolution des autres paramètres renforce cet *a priori* sur les liens entre transport en suspension et excédent en fines.

¹⁴ Des applications de formules classiques permettant de déterminer les diamètres des grains transportables en suspension ont montré (au paragraphe 2.2.3) que cette taille est de l'ordre d'un cm dans un torrent en crue.

7.4. Description sommaire des torrents retenus

Il ne s'agit ici que d'un résumé très bref des observations réalisées lors des mesures de terrain. En effet, l'objectif est de pouvoir suivre les explications données par la suite en connaissant les particularités essentielles de chaque torrent. Il ne s'agit pas ici d'une description assez précise pour pouvoir conduire une interprétation de la dynamique du torrent.

7.4.1. Critère de sélection

D'une façon très générale, les mesures de terrains sont toujours caractérisées par une forte imbrication de phénomènes différents. Il est alors nécessaire de les identifier pour pouvoir isoler le comportement que l'on désire étudier.

Cette diversité prend toute son ampleur dans le cas d'un torrent. En effet, celui-ci intègre toutes les érosions se produisant dans un bassin versant généralement hétérogène. De plus, les sollicitations hydrologiques sont très changeantes dans l'espace comme dans le temps. Enfin, la réponse d'un torrent à une crue dépend des épisodes précédents. Il n'est donc pas étonnant que les phénomènes se produisant dans un torrent soient très variables, dans leur nature comme dans leur ampleur.

Or la connaissance de ces phénomènes est si sommaire qu'il n'est généralement pas possible d'extraire les caractéristiques du charriage torrentiel d'un torrent complexe.

Il a donc été nécessaire de rechercher des torrents satisfaisant les conditions suivantes :

- **transport solide important** afin d'avoir une morphologie tranchée minimisant l'influence d'autres phénomènes,
- **apports latéraux** (glissement de terrain, éboulement...) **négligeables** dans la zone de mesure pour mesurer uniquement les caractéristiques intrinsèques du charriage,
- **laves torrentielles inexistantes** ou sans effet sur la morphologie afin de pouvoir considérer uniquement le résultat du charriage torrentiel,
- absence d'intervention humaine dans la formation du lit (travaux de correction en particulier) qui détruit la morphologie naturelle du torrent,
- **interprétation morphologique fiable**,
- **station de mesure de débit** sur le torrent ou sur un cours d'eau très comparable pour pouvoir réaliser une étude hydrologique fiable.

Il s'agit de contraintes largement incompatibles : aucun site correspondant à toutes ces conditions n'a été trouvé et il a fallu se contenter de compromis. En effet, la forte activité en charriage correspond souvent à l'occurrence de laves torrentielles ou entraîne des travaux de protection. De même, la mesure du débit liquide est exceptionnelle lorsque le transport solide est élevé.

Ce sont finalement une dizaine de torrents qui ont été retenus (soit environ un dixième de ceux observés), à la suite de visites de terrain et d'indications des services départementaux de Restauration des Terrains en Montagne.

7.4.2. Le St Vincent

La description est particulièrement détaillée dans le cas de ce torrent, d'une part parce qu'il a fait l'objet d'une étude sur modèle réduit (voir chapitre 6), mais aussi pour montrer, à partir d'un exemple, les éléments servant à l'analyse d'un torrent.

7.4.2.1. Partie amont

Le torrent du *St Vincent* prend sa source dans le versant nord du *Canigou* (Pyrénées Orientales). Le flanc de la montagne forme alors un vaste cirque et une multitude de sources alimente le torrent. Elles se regroupent au niveau d'une très vaste moraine (plusieurs millions de m³). C'est pratiquement l'unique alimentation en matériaux.

Une étude de l'ADRGT (AZIMI & DEVAREUX 1988) concerne les processus d'affouillement dans cette zone en cas de forts débits. Elle montre le rôle des pressions interstitielles dans la stabilité du lit dans cette zone¹⁵. Des seuils RTM y limitent l'érosion. Ensuite, le torrent entre dans les gorges.

7.4.2.2. Les gorges

Il ne s'agit, globalement, que d'une zone de transit. Les zones instables sont assez nombreuses dans des versants à forte pente mais les volumes mobilisables sont très faibles et sans rapport avec le transport solide du *St Vincent*.

Le lit montre des signes de stabilité étonnants :

- énormes blocs apparemment descendus des versants et non affectés par l'écoulement,
- morphologie en marches d'escalier bien développée,
- absence de trace de mouvement récent de matériaux (la végétation y semble installée depuis longtemps),
- arbres de haute futaie dans le lit. Des traces de blessures anciennes sont visibles (crue de 1970). Il semblerait que l'hypothèse de passage de laves doit être repoussée car ces arbres n'étaient pas assez souples pour plier et il semble impossible que la lave ou même des blocs de plusieurs m³ soient passés en les évitant.
- aucune trace de bourrelets latéraux n'est visible sur les berges,
- la pente très rapidement variable : on observe, par exemple, peu en aval de la *cascade des Anglais* une pente qui passe de 8 à 13% de part et d'autre du point de mesure.

Ainsi, les observations possibles dans la partie inférieure des gorges semblent largement en contradiction avec celles réalisées sur le cône et les comptes rendus historiques. La seule hypothèse qui permette d'unifier ces observations consiste à admettre que le transport solide dans la gorge ne se produit que pour des événements

¹⁵ Leur étude montre que l'affouillement, en abaissant le niveau du fond, permet d'atteindre plus facilement les conditions critiques (remontée des circulations d'eau souterraines au niveau du lit) favorisant l'arrachement de grandes quantités de matériaux. On voit, dans ce cas précis, une explication du changement de nature des phénomènes torrentiels au cours du temps. Ainsi, il est probable que le *St Vincent* connaisse dans l'avenir d'autres transports solides importants.

exceptionnels (de l'ordre de la crue de 1970), le lit retrouvant ensuite rapidement une nouvelle stabilité.

7.4.2.3. La zone de dépôt

Il s'agit d'une aire de dépôt dont la forme a été imposée par le relief ce qui entraîne une zone d'arrêt grossièrement rectangulaire. Les dimensions approximatives en sont les suivantes:

- Longueur (sortie des gorges à 870 m - pont de *Fillois* à 710 m) : 1400 m,
- Largeur : De l'ordre de 200 m (Il s'agit de la valeur concernant les dépôts de 1940 car les enrochements actuels limitent cette valeur à une centaine de mètres au plus),
- Dénivelée : 160 m ce qui correspond à une pente moyenne de 11,4 %.

La limite aval est assez arbitraire et correspond à la tête du canal à bief affouillable. D'importants travaux ont déjà été conduits sur cette zone de dépôt et deux chenaux ont été creusés. La morphologie a donc été largement modifiée (mise en place de seuils d'enrochement câblés) et seule une faible crue a remanié (faiblement) le lit.

La sortie des gorges s'effectue très brutalement mais la largeur du lit majeur ne progresse que lentement jusque vers 830 m d'altitude. C'est là que se trouve l'étrave qui sépare le lit en deux chenaux parallèles sur environ 900 m. La morphologie d'ensemble du cône se trouve donc bouleversée par un ouvrage qui a nécessité 200 000 m³ de terrassement. C'est vers 740 m que le torrent retrouve un lit unique pour se jeter presque immédiatement dans le canal bétonné.

Transition gorge - séparateur

Il s'agit du tronçon entre le gué de l'altitude 870 m et le séparateur. Cette zone a été pourvue d'une faible section pour limiter les dépôts (guère plus d'une dizaine de m²). Jusqu'à l'altitude 845 des affleurements rocheux sont épisodiquement visibles.

La pente y est d'environ 13 à 14 %. Les blocs sont de taille importante (environ un mètre). La morphologie est du même type que dans les gorges. La contribution des versants au pavage du lit n'est pas à négliger.

Quelques dépôts (arrêts en masse) sont visibles, mais ont été entièrement remaniés. On peut cependant considérer que c'est une zone de transit sauf pour les très gros blocs (quelques m³) dont l'origine est incertaine.

La zone du séparateur

Dès que le "cône" devient assez large, vers 830 m d'altitude, une zone triangulaire d'environ 100 m de côté a été creusée. Elle se termine par une étrave séparant l'écoulement en deux chenaux. L'alimentation dissymétrique favorise le canal creusé en rive gauche.

La pente moyenne y est de 12 à 13%. Il apparaît de nombreux petits dépôts (quelques dizaines de m³) que l'on peut attribuer à l'action conjuguée de l'élargissement et de la diminution de pente. D'anciens chenaux d'écoulement sont visibles et des bourrelets latéraux sont clairement visibles en tête du chenal de droite.

La morphologie durant les crues y est sans doute très instable (chenaux en tresses) distribuant rapidement l'écoulement de part et d'autre du séparateur tant que celui ci

reste en rapport avec les débits. Certains gros blocs sans doute laissés volontairement lors des travaux ont largement commandé les dépôts.

Au début du chenal rive gauche, on peut observer une structure de reprise de quelques m³.

Confluence des chenaux et entonnement

Il s'agit de la zone qui se trouve entre la fin du séparateur et le pont de *Fillols*. Après la réunion des deux chenaux, les seuils câblés continuent de rythmer la morphologie du lit jusqu'au premier seuil en béton du canal.

Comme au niveau du séparateur, les dépôts sont nombreux. Il semble en tout cas qu'il n'y ait pas eu d'exhaussement notable depuis 87. A l'échelle des petits dépôts réalisés jusqu'à maintenant, les câbles des seuils artificiels sont déterminants.

7.4.2.4. Canal d'écoulement à bief affouillable

Comme tous les ouvrages de ce type, le chenal est structuré par des bancs alternés encombrés de végétation.

Au niveau de la zone d'entonnement, on constate que le remplissage des biefs affouillables - donc la pente d'équilibre - décroît vers l'aval. Ce phénomène est difficilement explicable autrement que par un processus transitoire et un déséquilibre en fin d'une crue de faible durée. En effet aucune évolution granulométrique n'a pu être mise en évidence.

7.4.2.5. Bief aval jusqu'au confluent

Il s'agit d'une zone de transit, l'érosion comme les dépôts y étant limités. La pente diminue assez rapidement en aval du chenal à bief affouillable et se stabilise vers 6 % jusqu'au confluent avec le *Cady*. Cependant, le lit s'écoulant dans une zone alluvionnaire, il est probable qu'un tarissement du transport solide en amont entraîne à terme des affouillements qui pourraient favoriser l'érosion des ravines en rive droite à la sortie de *Vernet*.

7.4.3. La Béoux

La *Béoux* est un affluent du *Buëch* à quelques km en amont de *Veynes* (Hautes-Alpes) qui prend sa source au pied de *la crête des Aiguilles* vers 2000 m d'altitude. Elle se charge alors en matériaux essentiellement granulaires provenant d'éboulements et forme apparemment de puissantes laves jusqu'à l'altitude de 1300 m. Elle reçoit là les laves du torrent à forte pente de *Pierres Taillées*.

L'arrêt de toutes les laves en amont du confluent semble assez probable à cause de la très nette diminution de pente (réduction de 9 à 5%) et de la vaste surface disponible pour les dépôts. Il y a ensuite reprise des éléments par charriage. La morphologie est très variée et montre l'effet combiné de dépôts des laves venant du torrent de *Pierres Taillées* et de reprise partielle par charriage, le long de griffes longitudinales d'érosion.

Il s'agit de charriage aux caractéristiques très variables d'une crue à l'autre. Le lit en tresse est alors très mobile. Un km en aval, une vaste zone de dépôt se développe, sur

environ 50 m de largeur et 2 km de long. La pente passe alors très progressivement de 4 à 2%.

C'est en aval de cette zone qu'arrive le torrent de *Rabioux*, qui amène de très grosses laves. Le vaste cône de dépôt ainsi que la morphologie du lit montrent qu'il s'agit d'un torrent très actif. La pente moyenne du cône est d'environ 15%, (17% à la sortie de la gorge). Un tri granulométrique longitudinal est clairement visible, en particulier pour les blocs de grande taille déplacés par l'écoulement (plusieurs mètres de diamètre). La *Béoux* malgré la forte pente dans ce secteur, ne parvient que difficilement à se frayer un lit à ce niveau.

Quelques centaines de mètres en aval du confluent, la *Béoux*, très chargée en matériaux, prend une morphologie caractéristique avec un lit en tresse très large, une pente faible, une multitude de bras morts. Elle arrive ainsi au *Buëch* avec une pente inférieure à 1%. Des mesures ont été réalisées de l'amont du confluent avec le torrent de *Pierres Taillées* jusqu'à celui avec le *Rabioux*.

7.4.4. Le Rabioux de Châteauroux

Le *Rabioux* est un affluent important de la *Durance* en amont d'*Embrun* (Hautes-Alpes). La superficie de son bassin versant est de 53 km² et son lit est long de 13 km. Dans le haut du bassin versant, les zones d'érosion sont limitées et la morphologie du lit reflète une relative stabilité et un transport solide limité aux événements exceptionnels.

Mais c'est vers 1300 m que le torrent, en affouillant des glissements de terrain, se charge en matériaux. Les zones d'érosion sont nombreuses et hétérogènes. Quatre grands barrages stabilisent le lit et servent de plage de dépôt entre 1050 et 1100 m¹⁶. Immédiatement en aval, le lit suit un S, la pente diminue et il semble que le dépôt des blocs les plus énormes commence à ce niveau. Le torrent arrive alors sur son "cône", un peu en amont du pont de la RN94. Ce cône, à cause des formations géologiques de la vallée, a l'aspect d'une bande de 200 m de largeur et de 2 km de long. La voie ferrée passe à mi-pente.

Il est possible que le *Rabioux*, malgré l'importance de son bassin versant, soit parcouru par des laves lors d'épisodes exceptionnels. Celles-ci se déposent sur l'ensemble du cône, mais plus particulièrement en amont de la voie ferrée qui joue, peut être, pour les événements très exceptionnels, le rôle d'un barrage de plage de dépôt. Certaines laves, probablement plus fluides, poursuivent en aval mais atteignent rarement la *Durance*. La morphologie du lit majeur, dans son ensemble, plaide en faveur de cette hypothèse.

Cependant, l'importance du bassin versant explique que les débits liquides soient importants. Ainsi la morphologie y est-elle typique du transport par charriage, en particulier dans le lit mineur. Cependant il est très difficile de faire la part de l'influence de chacun des modes de transport : en effet, si les laves se produisent

¹⁶ Depuis les mesures (été 91), un barrage de grande taille a été réalisé à l'aval de ces ouvrages. De plus, la déviation de la RN94 est en travaux immédiatement en amont de la voie ferrée, bouleversant la morphologie locale. Enfin, un site d'extraction des matériaux va être mis en place au niveau du confluent avec la *Durance*. La description correspond à l'état initial.

exceptionnellement et en début de crue, elles apportent des éléments qui ne peuvent être repris en charriage. Ils initient alors le développement de marches d'escalier et imposent de fortes contraintes sur leur développement. Ainsi, même dans le lit mineur, on trouve des éléments d'une taille sans rapport avec l'ensemble des matériaux.

7.4.5. La Cerveyrette

La *Cerveyrette* est un important affluent en rive gauche de la *Durance* peu en aval de *Briançon* (Hautes-Alpes). Elle prend sa source sur la frontière Italienne. Son cours semble assez stable et influencé par des affleurements rocheux jusque vers 2060 m, à l'arrivée au hameau des *Fonds* (le bassin versant a alors une superficie de 23 km²). Elle parvient alors à une zone de dépôt étendue située à la confluence avec un torrent d'importance comparable. Ce dernier semble transporter plus d'éléments et il est possible qu'il apporte des laves torrentielles jusqu'au confluent.

Vers 2000 m arrive un premier torrent à lave peu actif. La pente passe alors de 3 à 9% mais retrouve rapidement la valeur de 4%. Vers 1980 m, c'est un cône d'éboulis peu actif qui apporte quelques éléments au torrent et surtout qui en réduit la largeur.

En aval du *Clouzet*, un dépôt assez large semble s'expliquer par l'arrivée d'un torrent à laves un peu plus bas. La pente atteint alors la valeur de 10%. L'influence de ce torrent se poursuit jusque vers 1940 m après une nette diminution de la pente (on retrouve 3%) et la génération d'une zone de dépôt. Il est possible que des laves continuent sur plusieurs centaines de mètres.

Une vaste zone de méandres se trouve ensuite vers 1930. Elle semble jouer un rôle important de régulation du transport solide durant les crues et amortit probablement les fortes variations d'apport des affluents (arrivée d'une lave ou non).

Le cours est ensuite assez régulier jusqu'à un rétrécissement brutal dont les causes semblent sans rapport avec la dynamique torrentielle. Après ce défilé d'environ 500 m de longueur, la *Cerveyrette* arrive sur une très vaste zone de dépôt de 2 km de long, pour une largeur d'environ 500 m. Il s'agit d'un ancien lac en cours de comblement formé par une ancienne moraine frontale. Le transport solide (au moins pour le charriage) semble être complètement arrêté par cette zone. C'est la limite aval des mesures réalisées (le bassin versant correspond alors à une superficie de 39 km²).

7.4.6. L'Infernet

Entre *St Paul* (Alpes de Haute - Provence) et le col de *Vars*, le ravin de *l'Infernet* s'écoule de la *Grande Combe* (2938 mètres) jusqu'aux environs de *Melezen* où il forme avec d'autres torrents le *Monnal*, ruisseau complexe pour lequel les affleurements rocheux sont nombreux et les sources d'alimentation multiples.

L'Infernet lui même, draine un bassin versant de quelques km². Le transport solide semble y être réduit, au-dessus de 2000 mètres d'altitude.

Un affluent en rive droite, draine un bassin versant plus réduit mais dans lequel la fourniture de sédiments par éboulement (*Rochers de Mejourn*) est très importante. Le lit de cet affluent exhibe une morphologie marquée de torrent à laves.

Immédiatement après la confluence se développe une vaste zone où les laves de l'affluent se déposent. La pente est d'environ 18%. La granulométrie, assez étendue est

probablement celle des éboulements qui fournissent les matériaux. Les matériaux sont alors repris ultérieurement par l'union des eaux des deux affluents. L'érosion, dans cette zone, se fait par le creusement de canaux de quelques m² de section. Il semble que toutes les laves s'arrêtent dans ce secteur ce qui s'explique par le passage de la pente de 28 à 18%.

C'est à partir du confluent que le torrent transporte de grandes quantités de matériaux, généralement par charriage. Une zone de dépôt, de taille réduite, se trouve vers *Mélezen*, juste avant le confluent.

7.4.7. Le torrent de Bresson

Il s'agit d'un affluent rive droite de *l'Isère*, 30 km en amont de *Grenoble*. Comme la plupart des torrents du secteur, son alimentation en matériaux est essentiellement due aux éboulements des falaises du massif de la *Chartreuse*. Cette caractéristique explique la part réduite de fines. Les fortes pentes engendrent des laves torrentielles qui ont profondément modelé la morphologie du lit (profil transversal en U, bourrelets de rives, éclaboussures de boue sur les très gros blocs).

Cependant, le charriage prend une place non négligeable en dehors de ces épisodes et remodèle les détails du lit. C'est sur l'un des sites remaniés que la majorité des mesures a été réalisée.

7.4.8. La Malsanne

La *Malsanne* prend sa source au niveau du *Lac du Vallon* (Isère), à quelques km du col *d'Ornon*, et se jette dans la *Bonne* à *Entraigues*. Dans la partie supérieure de son cours, le rôle des affleurements rocheux résistants semble prépondérant et le cours d'eau ne peut se former un lit alluvial.

C'est vers 1150 m qu'elle sort de gorges rocheuses pour couler sur l'énorme cône de dépôt (de forme rectangulaire) du *Merdaret*, torrent à lave alimenté par des falaises de schistes. Il semble qu'il ne passe pas de laves dans le lit de la *Malsanne* jusqu'au confluent avec le *Merdaret* (vers 1100 m d'altitude). C'est dans cette zone que les mesures ont été réalisées.

Les énormes quantités de matériaux amenées par le *Merdaret* bouleversent alors totalement le fonctionnement de la *Malsanne* sur quelques km. Ensuite, elle prend un caractère de rivière et la pente diminue jusqu'à quelques pour-cent. Les apports en matériaux sont alors nombreux et variés, mais concernent finalement de faibles quantités.

7.4.9. Le torrent de Bonnegarde

Le ruisseau de *Bonnegarde* draine un bassin versant de 21 km² sous la station de la *Plagne* (Savoie). Les crues semblent peu marquées et les laves absentes ou très rares. Historiquement, les archives n'évoquent que des engravements limités, ce qui correspond bien à la morphologie d'ensemble. Cependant, ce torrent a connu une crue importante durant l'été 1991, qui laisse craindre un changement de comportement de ce torrent.

Le lit a été intégralement parcouru du confluent avec l'*Isère* jusque vers 970 quelques jours après cette crue. Dans l'ensemble, les dépôts sont de taille réduite en accord avec la faiblesse générale du transport solide dans ce torrent.

A la confluence avec l'*Isère*, les traces d'un apport de matériaux important sont évidentes: petit cône dans le lit de la rivière, rupture de pente de l'*Isère* (il semble que le lit de la rivière ait été modifié sur une centaine de mètres ce qui correspondrait à un volume déposé d'environ un millier de m³).

7.4.10. Le Torrent des glaciers

Le *Torrent des Glaciers* s'écoule entre l'*Aiguille des Glaciers*, extrémité sud du massif du *Mont Blanc*, et *Bonneval* où il rejoint le *Versoyen*, affluent de l'*Isère* à *Bourg St Maurice*. La surface du bassin versant, à la hauteur des *Chapieux*, est de 57 km². Cependant, les pluies relativement violentes de la région (intensités 2 à 3 fois plus élevées qu'à *Bourg St Maurice*) expliquent des crues de grande ampleur. De plus, la vallée très encaissée en amont des *Chapieux* facilite la formation d'embâcles. Les zones d'érosion sont très étendues et hétérogènes tant sur le plan géologique que par leur fonctionnement (érosion glaciaire, glissement de terrain et surtout éboulement).

Le profil longitudinal montre une vaste zone de dépôt à l'altitude 1520 : la plaine des *Chapieux* avec 2% de pente est une zone d'arrêt naturelle des matériaux. C'est dans cet ancien lac glaciaire que l'ensemble des mesures a été réalisé.

Les deux affluents principaux au niveau des *Chapieux* ne semblent pas avoir d'effet direct sur l'évolution de la pente mais influent les divagations transversales du torrent, le repoussant vers la rive opposée. En fait, il semblerait que la non-concomitance des crues soit importante : lors d'apports importants de matériaux, le *Torrent des Glaciers* est repoussé sur la rive opposée. Au contraire, lors de la crue du cours d'eau principal, la force du courant est suffisante pour permettre à l'écoulement de remanier les dépôts des affluents et de les étendre sur plusieurs centaines de mètres ce qui explique la régularité de la pente. Ce fonctionnement est évidemment facilité par la faible différence de granulométrie entre les différents cours d'eau au niveau des confluents.

7.5. Résultats concernant les zones morphologiques

Il s'agit de présenter ici les principales "règles" expliquant le fonctionnement global d'un torrent en s'attachant particulièrement aux mécanismes de tri granulométrique.

Ces "règles" ont pu être mise en évidence à partir de l'analyse des données mesurées. Il ne s'agit cependant que de *tendances*, la multitude d'influences sur un torrent naturel permettant d'expliquer toutes sortes de particularités.

Dans un premier temps, seul le comportement global du torrent est décrit. Une approche plus fine concernant les caractéristiques des structures morphologiques est réalisée au paragraphe suivant (7.6).

7.5.1. Evolution longitudinale

Il n'est pas possible de rendre compte de l'évolution longitudinale à partir de l'ensemble des valeurs collectées sur des torrents différents. Cependant, il est possible de tirer des tendances à partir des résultats obtenus indépendamment sur les principaux torrents.

7.5.1.1. Profil longitudinal

L'évolution du profil longitudinal d'un torrent correspond-t-elle à une tendance régulière comme dans le cas des rivières où est-elle seulement une succession de particularités?

Le profil longitudinal "classique" est une exponentielle décroissante de l'amont vers l'aval¹⁷. S'il est difficile de conclure quant à la forme de la décroissance de la pente de l'amont vers l'aval, deux torrents montrent une évolution régulière. Il s'agit de deux petits cours d'eau, sans affluent majeur : le torrent de *Rabioux* (affluent de la *Béoux*) n'est soumis à aucune influence le long de son cône de dépôt et le torrent de *Bonnegarde* qui a subi une forte crue quelques jours avant les mesures.

De plus, le *Torrent des Glaciers* connaît une lente décroissance de la pente dans la zone de mesure malgré l'apport de trois torrents beaucoup plus raides. Il semble dans ce cas que la disproportion entre les débits (liquides et solides) et l'absence de différence significative entre les granulométries transportées, expliquent que les apports latéraux soient balayés par le torrent principal.

Cependant, la plupart des torrents visités subissent les apports de torrents très influents. C'est le cas de la *Béoux*, de la *Cerveyrette* et, en partie, de l'*Infernet*. Ces particularités sont détaillées au paragraphe 7.4. Dans ce cas, le profil longitudinal se présente plutôt comme une succession de zones où la pente décroît régulièrement, séparées par des discontinuités au niveau des confluent comme le montre la figure ci dessous dans le cas de la *Cerveyrette*. Il est clair que des éboulements ou des glissements de terrain latéraux jouent un rôle comparable.

¹⁷ Cet aspect a été abordé dans le chapitre 2, en particulier à travers les travaux de PARKER (1989 & 1990).

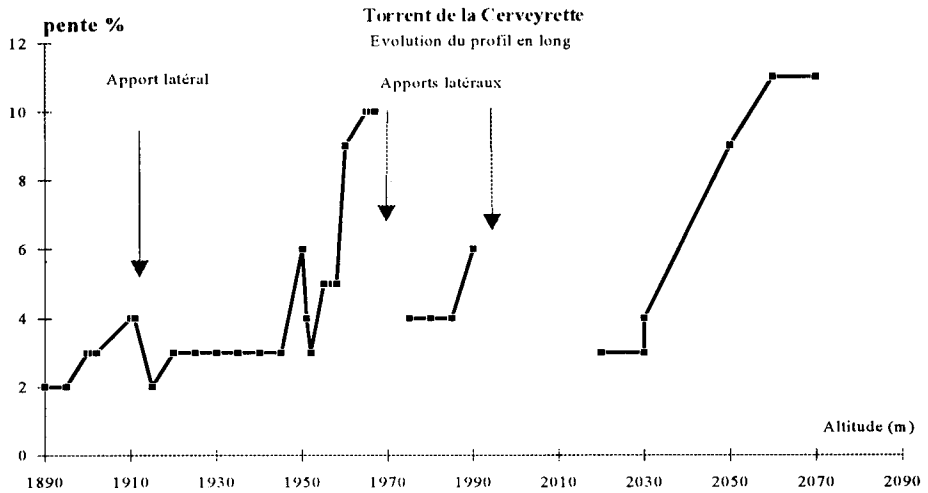


Figure 7-3 : Evolution longitudinale de la pente sur le torrent de la Cerveyrette.

Un autre type de rupture de pente peut s'expliquer par un changement de mode de transport, comme sur le torrent de *l'Infernet* où la pente diminue brusquement dans une zone d'arrêt des laves et de reprise par le charriage.

De plus, il semble que les caractéristiques intrinsèques du charriage torrentiel sont capables de modifier la pente. Ainsi, la figure suivante montre le profil longitudinal de la zone de dépôt du *St Vincent* :

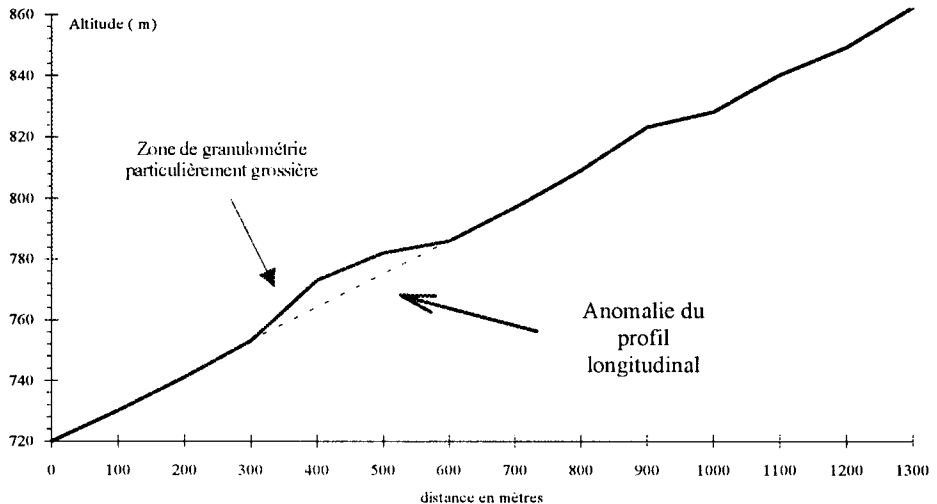


Figure 7-4 : Profil en long de la zone de dépôt du torrent du *St Vincent*.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette particularité :

- **Le caractère transitoire des crues**, associé à une lente propagation du débit solide (même si la présence d'un bourelet frontal de granulométrie nettement plus élevée est difficile à justifier).
- **L'arrêt d'une lave torrentielle**. Cependant, il s'agirait d'une lave d'un très grand volume (d'une hauteur d'environ 10 m et dont la largeur et la longueur seraient de l'ordre de plusieurs centaines de mètres). Ces dimensions sont très improbables dans un torrent de cette taille alors que l'occurrence des laves torrentielles n'est pas clairement établie!
- Enfin, les essais sur modèle ont montré la présence de "**structures à déplacement lent**" (décrites au paragraphe 6.3.3.5). Or, "l'anomalie" notée sur le terrain semble tout à fait en rapport avec les observations sur modèle. Il semble donc que ce soit ce type de structure que l'on puisse observer dans la nature. Il convient de noter que la taille de cet amas de matériaux est telle qu'il n'est pas visible directement mais apparaît seulement sur le profil en long.

D'autre part, la largeur et la configuration du lit peuvent influencer la pente. C'est le cas du *Rabioux*, gros torrent pour lequel les divagations et les dépôts ne peuvent se produire que lorsque le lit majeur dépasse quelques dizaines de mètres de largeur. Il y a alors, au sommet du cône, une succession d'élargissements et de rétrécissements d'origine géologique, et des variations de pente en correspondance.

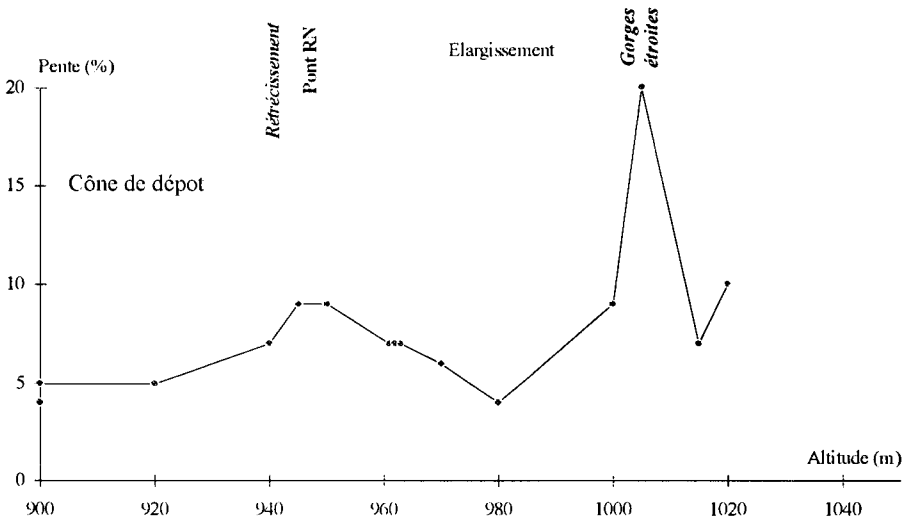


Figure 7-5 : Evolution longitudinale de la pente sur le *Rabioux de Châteauroux*.

Enfin, la dernière source de variation de pente est constituée par les travaux dans le lit. La séparation en deux canaux sur le *St Vincent* ou la route traversant *l'Infernet* expliquent des anomalies dans le profil en long du torrent.

En conclusion, les torrents suivent naturellement un profil en long de forme exponentielle mais la pente est très sensible aux conditions extérieures (affluent, mode de transport solide, caractéristiques du charriage hyperconcentré, largeur du lit). Ainsi, le profil longitudinal réel des torrents ressemble à profil en long dont la pente diminue régulièrement mais qui est "déformé" par une succession de particularités.

7.5.1.2. Variations des caractéristiques granulométriques en fonction du profil en long

L'évolution longitudinale de la granulométrie du lit permet elle de mieux connaître les phénomènes de tri en torrent?

Seules les caractéristiques granulométriques d'ensemble sont prises ici en considération. Les particularités de chaque type morphologique sont traitées au paragraphe 7.6.

Dans l'ensemble, la taille des éléments diminue progressivement de l'amont vers l'aval. Cependant, le torrent de *Bonnegarde* est le seul pour lequel cette évolution est très régulière. Là encore, cette caractéristique s'explique par des mesures réalisées immédiatement après une crue significative et les faibles possibilités de dépôt et de divagation dans le lit.

L'évolution des paramètres granulométriques suit assez bien celle du profil en long. Ainsi, tous les éléments le modifiant influencent aussi la granulométrie¹⁸.

Dans la majorité des cas, l'évolution longitudinale concerne principalement la partie supérieure de la courbe granulométrique (en particulier à partir du d_{60}). Cependant, on note souvent des irrégularité dans l'évolution longitudinale. Ainsi, la figure suivante montre l'évolution des mesures dans le cas du *St Vincent*. On notera - par exemple - que la granulométrie mesurée à 740 d'altitude est nettement plus grossière que celles à 780, c'est à dire qu'elle ne suit pas l'évolution générale.

¹⁸ L'interaction entre la pente et la granulométrie d'un cours d'eau a toujours été reconnue. La prise en considération de chaque paramètre isolément permet d'éclaircir un peu la nature physique des liens les unissant.

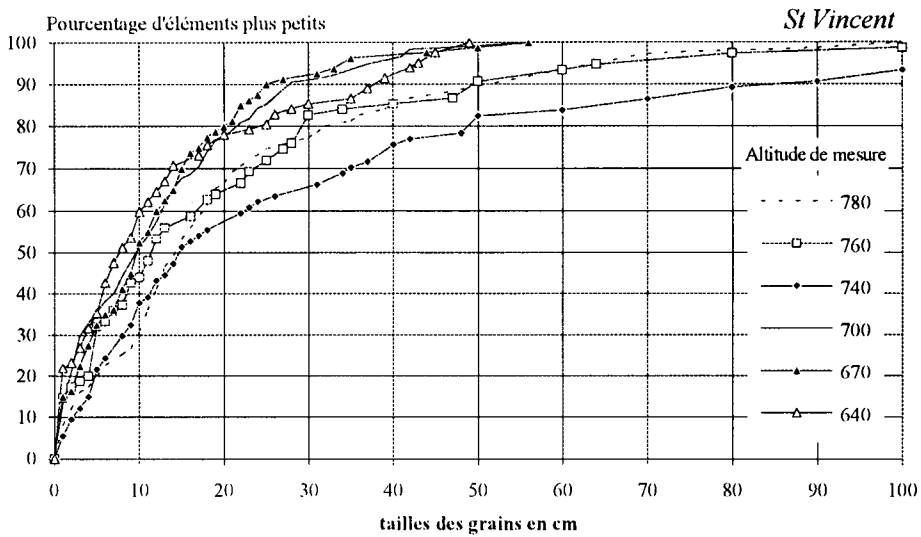


Figure 7-6 : Evolution de la granulométrie le long de la zone de dépôt du *St Vincent*.

Cette évolution ne concerne, là encore, que les zones contenant les plus gros éléments et on observe un plafonnement des valeurs plutôt qu'un regroupement autour d'une courbe. Ainsi, la *Béoux* montre deux types de structures morphologiques : certaines suivent l'évolution longitudinale alors que d'autres y sont totalement insensibles (voir paragraphe 7.6.3).

De plus, on observe essentiellement une réduction de la dispersion des paramètres granulométriques en particulier dans les zones de dépôt. Ainsi, la figure suivante montre - par exemple - l'évolution du d_{90} le long de la zone de dépôt du *Rabioux de Châteauroux* (valeurs correspondant aux mouilles exclues¹⁹).

¹⁹ On verra en effet au paragraphe 7.6.4 que les mouilles sont très peu sensibles à l'évolution longitudinale. Leur ajout rend seulement la lecture du graphique plus difficile, et masque artificiellement des évolutions réelles.

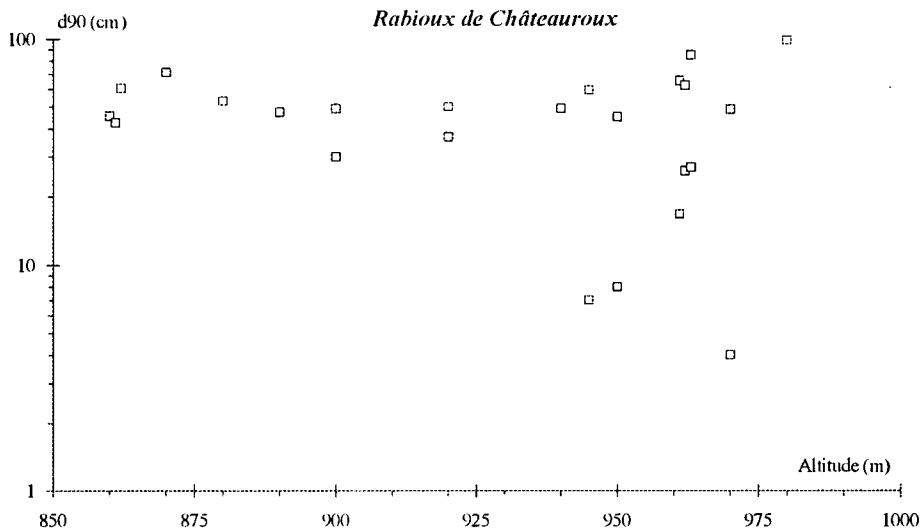


Figure 7-7 : Evolution longitudinale du d_{90} le long de la zone de dépôt du *Rabioux de Châteauroux*.

D'autre part, les observations réalisées sur le modèle réduit de 60 cm de large avaient montré que les différentes structures morphologiques permettaient de stocker des éléments fins et grossiers²⁰, conduisant à un net resserrement de la granulométrie transportée. On avait vu aussi que les divagations entraînaient une nette diminution du débit solide.

Ainsi, tout se passe donc comme si les zones de dépôt servaient d'abord à éliminer tous les transports solides "hors normes" et que ceux qui parviennent à l'aval avaient des caractéristiques granulométriques correspondant à la composition optimisant les possibilités de transport. Les dépôts ne sont alors plus représentatifs de la granulométrie transportée mais plutôt des éléments n'y correspondant pas.

Enfin, les zones de dépôt apparaissent comme un élément régulateur du transport solide, tant du point de vue de la granulométrie que du débit solide.

Cependant certains torrents ne montrent aucune autre évolution de la granulométrie en fonction de la situation longitudinale. Ainsi, les relevés des transects sur le *Rabioux de Châteauroux* ne dégagent aucune tendance significative :

²⁰ C'est aussi le cas des marches d'escalier où le stockage d'éléments de taille intermédiaire est plus réduit.

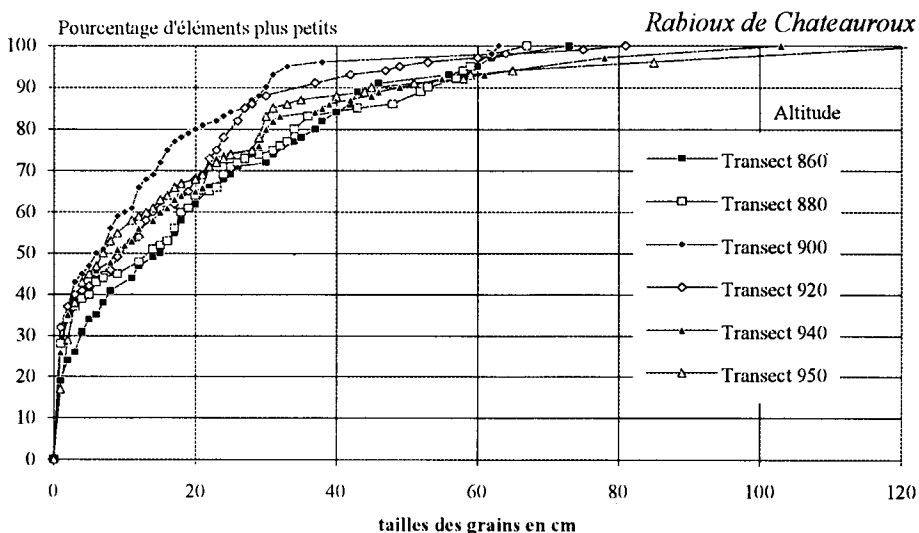


Figure 7-8 : Granulométrie suivant différents transects dans la zone de dépôt du *Rabioux de Châteauroux*.

Il semble que cette particularité est à mettre au compte des dunes à forte pente²¹ qui parcourent le cône exceptionnellement mais qui ont probablement un rôle déterminant sur la granulométrie. En effet, toutes les conditions semblent réunies pour que ce torrent développe de telles structures sur plusieurs dizaines de mètres de longueur et quelques mètres de hauteur. On en observe d'ailleurs des restes nets sur le terrain. Or ces dunes à forte pente engendrent une ségrégation granulométrique très marquée et indépendante de la situation longitudinale²¹. Il est donc normal que la mesure de granulométrie suivant des transects reproduise de très fortes variations. Cependant, le rôle régulateur de ces dépôts apparaît, car on note une diminution de la dispersion en allant vers l'aval.

D'autre part, le torrent de l'*Infernet*, ne montre aucune évolution marquée des paramètres granulométriques en fonction de la pente. Cette particularité s'explique sans doute par les fortes pentes de ce torrent. Il est probable que lors des crues, la concentration en éléments transportés soit très importante. Dans ce cas, le tri granulométrique est faible, en particulier par rapport aux incertitudes de mesure.

Ainsi, il apparaît bien une évolution longitudinale de la granulométrie mais celle si est, plus encore que le profil longitudinal, très sensible aux conditions extérieures, et les tendances sont facilement gommées par des particularités locales.

²¹ **Au niveau de la dune à forte pente,** le tri est même inverse au dégradé granulométrique puisque les éléments fins se retrouvent en amont des éléments grossiers. Il n'apparaît cependant aucune alternance de la granulométrie car le lit majeur est nettement plus large qu'une dune à forte pente et la particularité granulométrique au niveau d'une telle structure (déjà largement gommée par les écoulements ultérieurs) est noyée dans d'autres particularités.

7.5.2. Effet de la pente

L'influence de la pente sur la morphologie et la granulométrie des lits torrentiels est elle aussi marquée que sur le débit solide?

Au contraire de la situation longitudinale il est possible de regrouper l'ensemble des mesures de pente locale obtenues sur des sites différents²². La figure suivante montre le d_{30} en fonction de la pente :

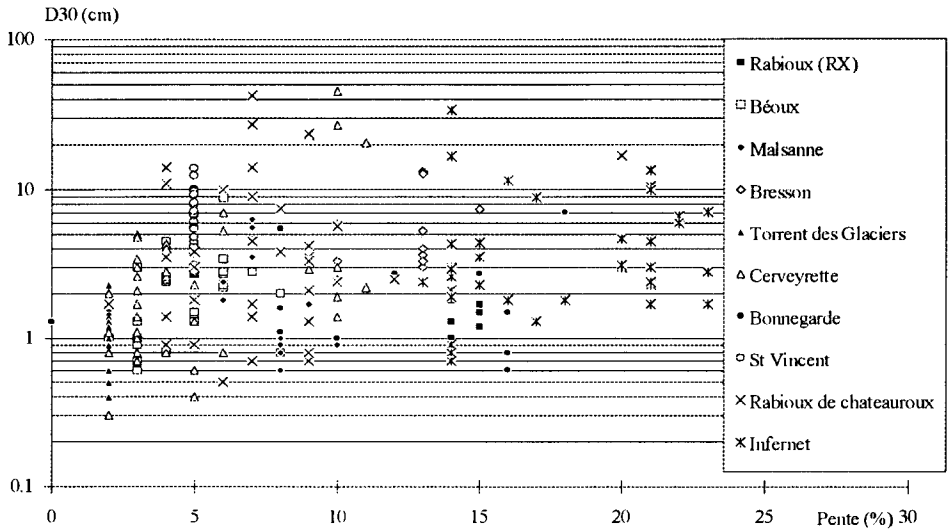


Figure 7-9 : d_{30} en fonction de la pente pour l'ensemble des torrents.

Chaque torrent apparaît comme ayant un comportement particulier et le recouvrement n'est que partiel. Cependant, l'ensemble des valeurs suit grossièrement la même évolution et il n'y a pas de rupture de comportement d'un torrent à l'autre.

La taille des éléments augmente avec la pente quel que soit le décile considéré, même si les déciles supérieurs sont les plus sensibles. Cependant, la dispersion est telle que la pente n'est certainement pas le seul paramètre explicatif.

Il semble que l'effet de la pente change lorsque celle-ci augmente : alors que l'ensemble des déciles augmente rapidement pour des pentes inférieures à 8%, aucune évolution n'est sensible par la suite. Cette caractéristique est visible, par exemple pour le d_{50} ²³ à la figure de la page suivante :

²² Le paragraphe 7.1.3 a cependant montré les risques d'une telle démarche. Il est donc nécessaire d'être très prudent et de procéder à une analyse torrent par torrent avant de formuler des hypothèses.

²³ La prise en compte du diamètre moyen n'a apporté aucune amélioration dans ce cas.

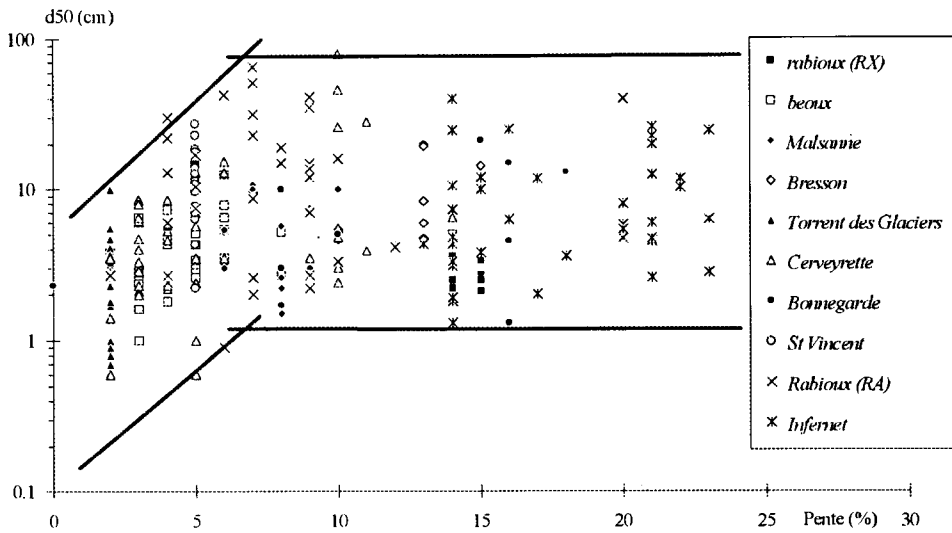


Figure 7-10 : Evolution du d_{50} en fonction de la pente pour l'ensemble des torrents.

Il semble donc que la pente modifie les caractéristiques granulométriques jusqu'à une certaine valeur et qu'elle est moins influente au-delà. Ce changement de comportement explique que les mesures de *l'Infemet* soient peu sensibles à la pente et à l'évolution longitudinale comme le montre la figure ci dessous concernant le d_{90} :

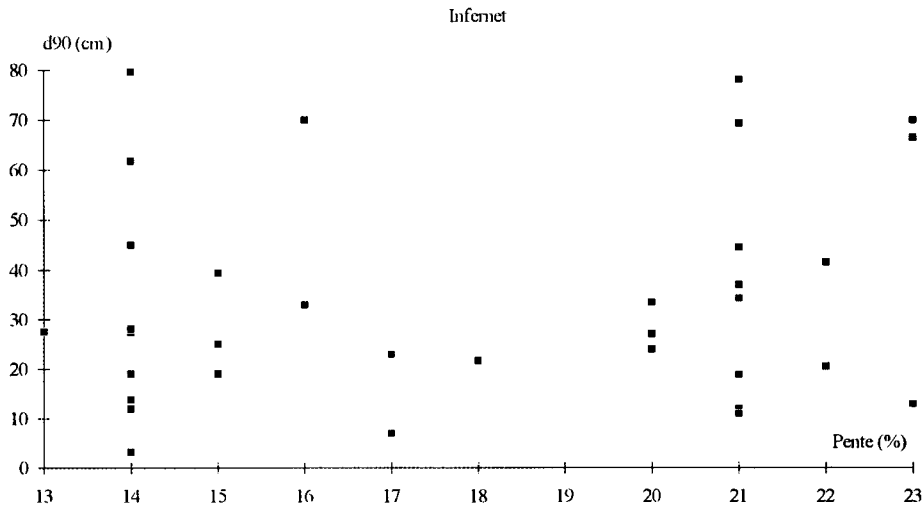


Figure 7-11 : Absence d'évolution longitudinale du d_{90} en fonction de la pente. Torrent de *l'Infemet*.

Cette constatation est à rapprocher du changement de comportement observé en canal par WHITTAKER & JAEGLI (1982) lors de la formation de marches d'escalier pour une pente d'environ 7.5%.

La figure suivante montre que l'excédent en fines est nettement limité en fonction de la pente.

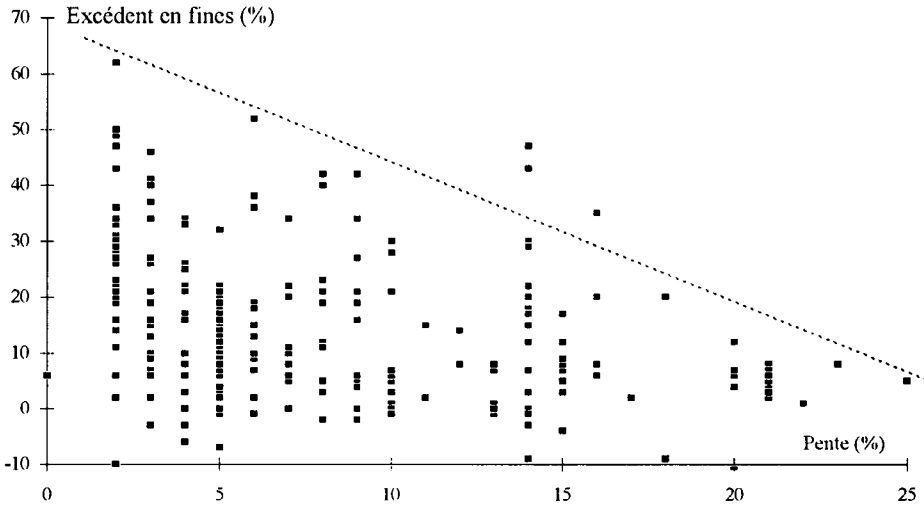


Figure 7-12 : Décroissance de l'excédent en fines en fonction de la pente pour l'ensemble des torrents.

Il est alors possible d'en tirer deux conclusions :

- L'excédent en fines est un paramètre assez indépendant du cours d'eau car les mesures sur différents torrents concordent bien, au contraire des autres paramètres granulométriques. Cette constatation est conforme aux *a priori* sur ce coefficient : il correspond au transport en suspension lors d'écoulements assez réduits. Ces conditions hydrauliques sont dépendantes de la géométrie locale mais très peu des caractéristiques d'ensemble du torrent, au contraire de ce qui se produit durant les fortes crues.
- L'excédent en fines ne peut être important que si la pente est faible. Une telle considération s'explique par la réduction de l'intensité de la turbulence lorsque la pente diminue. C'est un résultat tout à fait conforme avec les approches classiques. Cette évolution se retrouve tout naturellement en fonction de la situation longitudinale mais uniquement à cause de l'évolution de la pente. Il est en effet peu probable qu'il y ait un tarissement des éléments fins transportés sur le cône de dépôt.

7.5.3. Effet de l'historique des écoulements

7.5.3.1. Caractéristiques locales

Quelle est l'influence du lavage²⁴ sur le matériau en contact avec l'écoulement et sur sa granulométrie?

Ce paragraphe est basé sur l'étude de l'indice de lavage²⁴ (voir paragraphe 7.3.4). Il s'agit donc d'une comparaison directe entre ce paramètre - local - et la granulométrie mesurée au même point.

La prise en compte des résultats obtenus indépendamment sur différents torrents permet de tirer les conclusions suivantes concernant les relations entre les paramètres granulométriques et l'historique des écoulements.

- Le d_{90} , et surtout le rapport d_{90}/d_{30} montrent un effet de plafonnement en fonction du lavage : ces paramètres ne peuvent prendre des valeurs importantes que si le lavage est suffisant. La dispersion reste cependant considérable comme le montre la figure suivante :

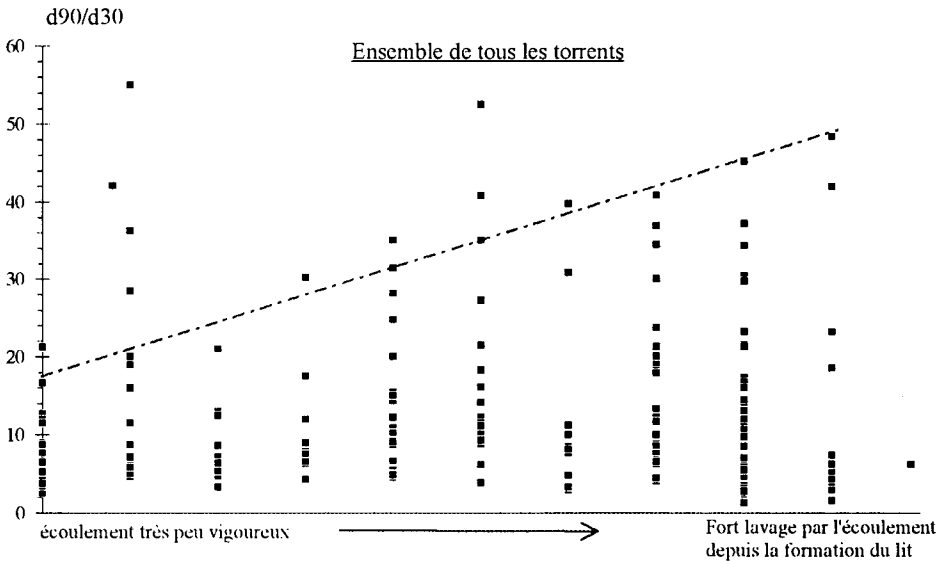


Figure 7-13 : Evolution de l'étendue granulométrique en fonction de l'intensité des écoulements formateurs.

Cette augmentation confirme l'hypothèse déjà formulée à partir des essais sur modèle réduit (chapitre 5 & 6) que le lavage se traduit d'abord par un allongement de la courbe granulométrique des matériaux du lit, c'est à dire par une pénurie d'éléments de taille moyenne. C'est l'hypothèse classique faite dans le cas des rivières.

²⁴ Ce paramètre a été estimé - à partir de considérations morphologiques - par l'indice de lavage. Il ne s'agit donc, dans ce paragraphe, que d'une description qualitative.

En effet, il était apparu sur modèle que le transport solide procédait, à chaque occasion, à un resserrement de la granulométrie transportée, c'est à dire à un appauvrissement de la fraction des diamètres moyens du lit.

- **L'excédent en fines** ne montre aucun lien avec le lavage. Cependant, dans le cas de la *Béoux*, l'excédent en fines est plus grand sur les terrasses abandonnées par l'écoulement que dans le lit mineur où le lavage est plus fréquent. Des résultats identiques ont été obtenus à partir de la carte granulométrique dressée sur le *Torrent des Glaciers* (voir annexe VI).

Il semble que la détermination de l'indice de lavage ne prend pas en compte la partie inférieure de la granulométrie. Cette remarque est tout à fait concordante avec la constatation qui veut qu'un observateur soit plus sensible à la partie grossière de la granulométrie.

- **Les zones fortement lavées par l'écoulement** montrent une très forte variabilité des paramètres granulométriques. C'est en effet dans ce cas que le lit peut développer toute une gamme de structures morphologiques pour répondre aux sollicitations très variables de l'écoulement.

Les essais sur modèles ont, en effet, montré que lorsque des structures morphologiques avaient la possibilité de se développer (largeur de l'écoulement non contrainte) des dunes à forte pente - embryonnaires ou non - avaient la possibilité de créer des dépôts aux caractéristiques très tranchées.

- **Pour un lavage très faible**, la dispersion des granulométries est élevée : il apparaît que les zones de dépôt ont été formées très rapidement au cours d'une crue importante. Elles montrent donc une très forte hétérogénéité directement liée aux fluctuations de la granulométrie transportée.
- **Au contraire, un lavage modéré** uniformise les caractéristiques granulométriques car il s'agit d'un écoulement "moyen", peu variable d'un site à l'autre où l'écoulement n'a pas eu le temps de modifier notablement la granulométrie. La dispersion est alors plus réduite pour un lavage intermédiaire. Il apparaît à nouveau une forte hétérogénéité des granulométries.

La dispersion des paramètres granulométriques passe donc par un minimum pour les lavages médiocres alors qu'elle augmente pour les valeurs extrêmes. La figure suivante montre cette évolution pour le d_{30} :

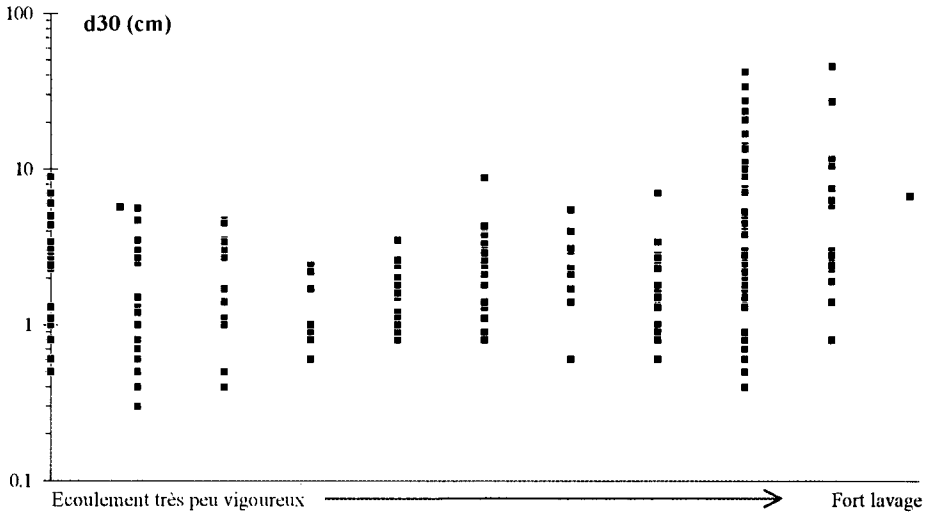


Figure 7-14 : Evolution de la dispersion de la granulométrie (d_{30}) en fonction du lavage pour l'ensemble des torrents.

7.5.3.2. Historique à long terme des écoulements à l'échelle du torrent

Si l'on veut prendre en considération l'historique depuis la dernière crue ayant remanié l'ensemble du lit, on peut considérer que des crues exceptionnelles bouleversent la totalité du lit majeur du torrent (il s'agit de crues plusieurs fois décennales) et qu'ensuite, des crues médiocres modifient partiellement certaines caractéristiques du lit en fonction des conditions hydrauliques du moment.

Ainsi, il apparaît que la morphologie d'un torrent est d'autant plus complexe que l'on se trouve éloigné de la dernière forte crue²⁵. Cette tendance est clairement confirmée par l'ensemble des torrents ayant servi aux mesures :

- Les mesures sur le torrent de *Bonnegarde* ont été réalisées quelques jours seulement après une très forte crue : ce sont celles qui montrent la plus grande régularité du profil longitudinal et de l'évolution granulométrique. De même, le torrent de *Rabioux* (affluent de la *Béoux*) qui connaît fréquemment des crues capables de remanier - en profondeur - son lit, présente des résultats très cohérents.
- Au contraire, le *Rabioux* de *Châteauroux* ou la *Malsanne*, qui n'ont pas connu de très forte crue récemment, présentent un lit beaucoup plus difficile à interpréter et des mesures nettement moins cohérentes.

²⁵ Il existe là un parallèle avec les torrents à laves qui reforment - ou qui conservent sans le modifier notablement - leur lit à chaque crue. Lorsqu'il n'y a que des laves, la lecture morphologique est particulièrement simple.

7.5.4. Confrontation avec la granulométrie transportée

Comment obtenir une image de la granulométrie transportée à partir de mesures et quels sont ses liens avec la granulométrie de surface du lit?

Sur aucun des torrents visités, il n'existe de poste de mesure de la granulométrie transportée. Cependant dans les cas particuliers du *St Vincent* et du torrent de *Bonnegarde*, il a été possible de connaître la granulométrie des zones érodées. On peut alors, dans ces deux cas particuliers, négliger la différence avec la granulométrie transportée en considérant qu'il n'y a pas de modification de la taille des éléments par le transport et que la zone de fourniture de matériaux est bien délimitée et homogène. Cependant, il ne s'agit que d'une moyenne sur le long terme, sans rapport avec celle que l'on aurait pu mesurer lors de la crue très modeste qui a formé les dépôts actuellement observables.

Pour les mesures sur le *St Vincent*, la figure suivante compare la granulométrie transportée estimée²⁶ à celles mesurées sur les principaux transects.

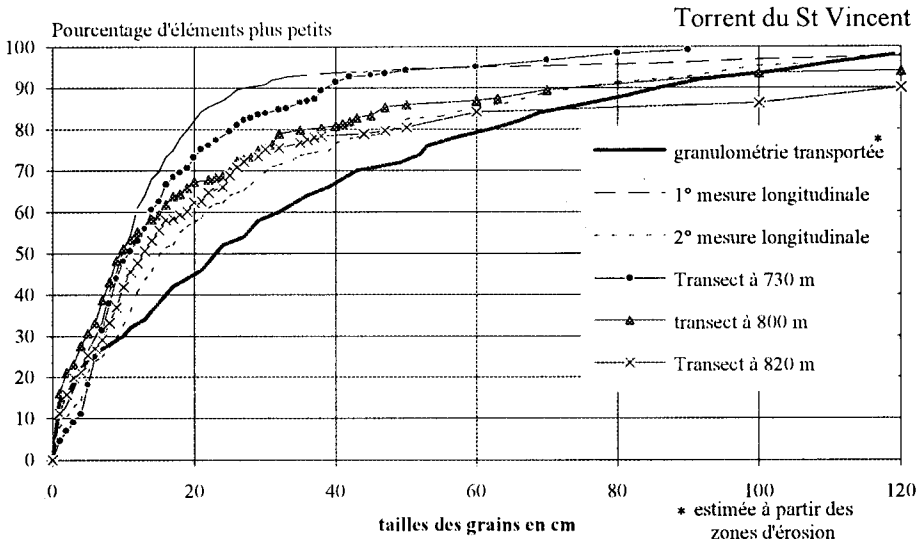


Figure 7-15 : Comparaison de la granulométrie transportée aux granulométries les plus représentatives de la zone de dépôt pour le torrent du *St Vincent*.

Il apparaît clairement que la granulométrie transportée est plus riche en éléments de taille moyenne (entre 15 et 80 cm) que celles relevées à la surface du cône.

²⁶ Il s'agit d'une valeur totalement indépendante de celle utilisée sur modèle réduit car cette dernière est calée pour obtenir un fonctionnement satisfaisant du modèle (voir paragraphe 6.2).

Sur le torrent de *Bonnegarde*, la granulométrie transportée est assimilée à celle d'un glissement de terrain. Elle aboutit aux mêmes résultats : dans le lit, le charriage augmente le nombre d'éléments de grosse taille au détriment des éléments de taille moyenne.

7.5.5. Effet d'un confluent

C'est seulement sur la *Cerveyrette* et la *Béoux* que des affluents ont un rôle important et que des jeux complets de mesures ont été réalisés.

Il s'agit de zones très hétérogènes où la lutte entre le torrent principal et son affluent pour influencer la morphologie locale se traduit par une forte hétérogénéité et une instabilité du lit directement à la jonction entre les deux écoulements. La détermination de la granulométrie "moyenne" d'une telle zone n'est probablement pas significative et reste très difficile. Ainsi, sur la *Béoux*, à la confluence avec le torrent de *Pierres Taillées*, les d_{90} de sites éloignés de quelques dizaines de mètres seulement sont dans un rapport de 15. Le d_{10} est encore plus variable avec un rapport entre deux mesures supérieur à 100.

La figure suivante montre l'évolution granulométrique dans le cas de la *Cerveyrette* au niveau du confluent avec un torrent à laves vers 2000 m d'altitude.

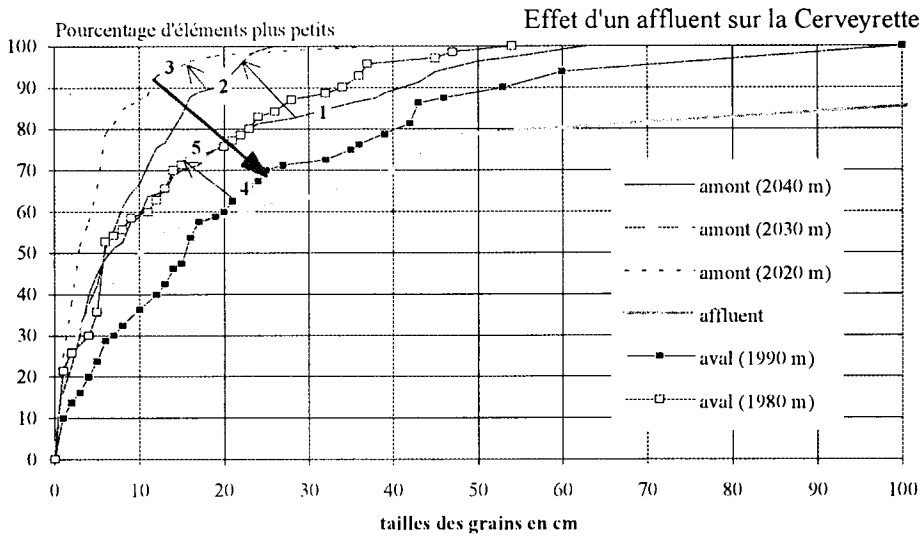


Figure 7-16 : Evolution granulométrique au confluent de la *Cerveyrette* et d'un torrent à laves.

Il apparaît nettement qu'en arrivant de l'amont, la granulométrie devient de plus en plus fine ce qui correspond à une dynamique de dépôt et à une réduction de la pente de 4 à 3%. Les mesures sur la *Béoux* sur le dépôt en amont du torrent de *Rabioux* ont montré que, immédiatement en amont du confluent, la pente augmente dans les zones

non influencées directement par l'affluent, sans doute par érosion régressive. Un résultat équivalent a été mesuré sur la *Malsanne*.

La granulométrie des apports montre clairement la différence entre les granulométries suivant le type de transport. Ce sont les 20 % des matériaux de l'affluent constitués de blocs de plus de 50 cm qui expliquent - en plus du transport par lave - la forte influence sur la *Cerveyrette*.

Immédiatement en aval, la taille des éléments augmente brusquement ce qui correspond à l'apport du torrent et à l'augmentation de la pente (6%). Ensuite, la granulométrie, de même que la pente diminuent, témoignant de l'effet limité des affluents. La *Cerveyrette* retrouve alors une pente et une granulométrie presque identiques à celles mesurées en amont et qui correspondent à ses caractéristiques générales (hydrologie, débit solide et granulométrie transportée) à ce niveau.

Cette distance caractéristique est très variable d'un site à l'autre. Ainsi, dans le cas du confluent du torrent de *Pierres taillées*, le lit de la *Béoux* est influencé sur plusieurs centaines de mètres comme l'atteste l'évolution longitudinale de la granulométrie.

On retrouve toujours les mêmes phases dans l'évolution des paramètres granulométriques au niveau de la jonction avec un affluent important. Cependant, chaque phase est plus ou moins développée.

Le confluent est révélateur de l'activité de chaque torrent, de son mode de transport, de l'âge de la dernière crue de chacun des cours d'eau mais aussi de la géologie des bassins versants et donc de la granulométrie des apports. Ce sont ces particularités qui expliquent - par exemple - que le *Torrent des Glaciers* ne soit pas influencé par les torrents affluents ou que *l'Ubaye* reste insensible au *Riou Bourdoux* :

Dans le premier cas, les apports des affluents correspondent à des volumes trop réduits et l'écart entre les granulométries transportées est très faible. En effet, la vallée au niveau du confluent est très large. Ainsi, les affluents n'ont pas encore construit de cône de dépôt assez grand pour rejoindre le *Torrent des Glaciers* avec une pente suffisante pour apporter des matériaux de grande taille.

Pour le *Riou Bourdoux*, les volumes solides apportés sont considérables, et ont permis la construction - dans le passé - d'un très vaste cône. Si celui ci est assez grand pour permettre un tri granulométrique, la pente relativement forte et le transport par lave, autorisent le transport de très gros blocs (plusieurs dizaines de m³ comme on a pu l'observer au début du siècle) jusqu'à *l'Ubaye*. Cependant, la rareté de ces blocs dans les apports explique que la rivière parvienne à reprendre l'ensemble des matériaux apporté sans qu'une rupture de pente soit nécessaire.

Cependant, dans les deux cas, les apports de matériaux modifient l'équilibre de la rivière et conduisent à une augmentation du nombre de bras en aval de la confluence.

7.6. Résultat concernant les structures morphologiques

7.6.1. Introduction - Prédominance de la morphologie

Les mesures réalisées sur le terrain ont montré le rôle prédominant des particularités morphologiques dans le fonctionnement global du torrent (tri granulométrique, conditions d'écoulement, transport solide...) mais aussi dans la dispersion des mesures granulométriques.

Or, l'identification de ces structures est largement subjective. Un des objectifs de ce travail est de relier la mesure de granulométrie (objective tant qu'elle reste locale) et la morphologie. Ainsi, les particularités de chaque morphologie sont décrites dans la suite. Ce travail est réalisé en essayant de définir la contribution de chaque structure morphologique au fonctionnement du torrent. Les explications avancées seront basées sur les résultats obtenus sur modèle réduit.

7.6.2. Matériaux remaniés

Existe-t-il un lien entre la granulométrie des couches superficielles du lit et celle des couches sous jacentes?

La différence entre les couches superficielles et profondes du lit est une réalité bien connue de la structure des lits des cours d'eau. Cette particularité correspond au phénomène de pavage²⁷.

Il est donc intéressant de comparer la granulométrie des matériaux en contact avec l'écoulement et celle des éléments remaniés qui correspondent aux couches profondes. Cependant, d'un torrent à l'autre, suivant le site retenu, les mesures sont très variables.

²⁷ En effet, le pavage apparaît comme le stade ultime d'un lit soumis à un lavage pendant une longue période.

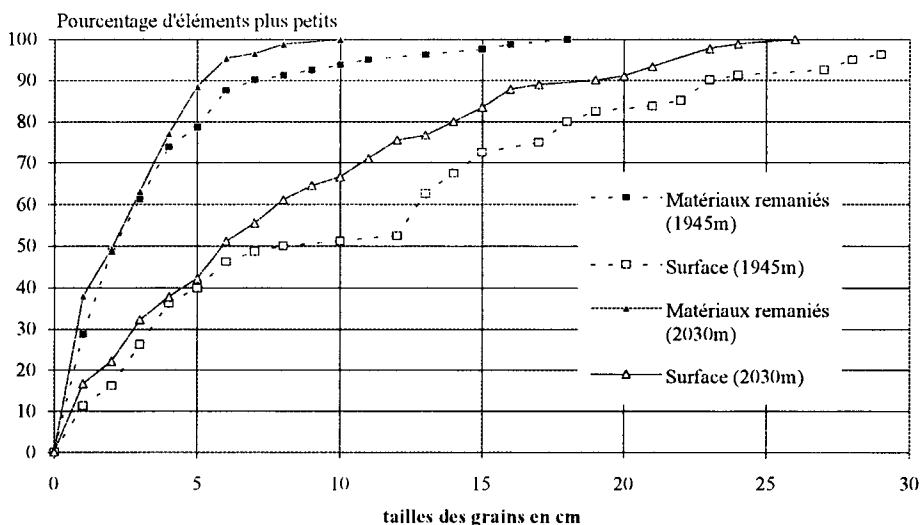


Figure 7-17 : Comparaison de la granulométrie des matériaux remaniés avec ceux se trouvant à la surface dans la partie amont de la Cerveyrette.

Ainsi, sur la Cerveyrette deux résultats très différents ont été obtenus :

1. aux altitudes 1945 et 2030, il y a une nette différence dans la taille des éléments et dans la forme des courbes entre la surface et les couches profondes comme le montre la figure précédente. Il apparaît que :
 - ◆ l'excédent en fines est environ deux fois plus fort pour les zones remaniées,
 - ◆ les grains des zones remaniées sont nettement plus petits,
 - ◆ le lavage conduit à des déciles moins variables d'un site à l'autre et donc à une homogénéisation du lit. Cette différence s'explique - comme dans le paragraphe précédent - en considérant que les couches profondes du lit sont représentatives d'une période très particulière dans la vie du torrent (évolution rapide du lit), alors que la surface est généralement en contact avec l'écoulement, ce qui correspond à des sollicitations plus "moyennes" spatialement. Cette différence n'est évidemment valable que pour les mesures granulométriques représentant l'ensemble d'une zone et non les morphologies particulières comme les marches d'escalier.
2. Les valeurs mesurées au niveau du brusque élargissement de la vallée en amont d'une très vaste zone de dépôt (altitude 1900 m) montrent, au contraire, que l'écart entre surface et profondeur n'est pas significatif par rapport à l'erreur de mesure. Ce fonctionnement surprenant doit être attribué aux particularités morphologiques de cette zone : l'écoulement a alors la possibilité de divaguer largement, de déposer "brusquement" des matériaux et de remanier en profondeur le lit sans laisser au torrent le temps de restructurer la surface.

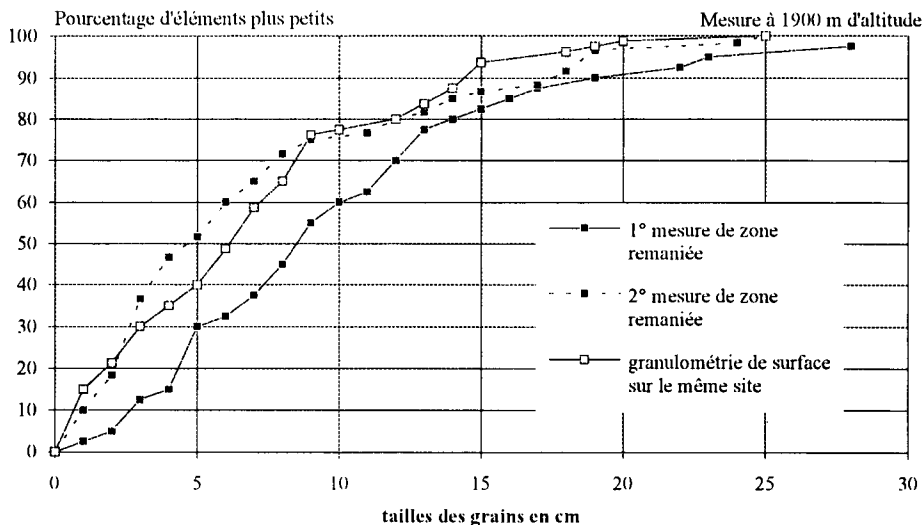


Figure 7-18 : Absence d'écart significatif entre la granulométrie de surface et celle du matériau remanié en aval des gorges de la *Cerveyrette*.

Les mesures sur le *St Vincent* montrent des résultats beaucoup plus tranchés. Sur trois sites, des mesures très locales de granulométrie ont permis de confronter la granulométrie de surface avec celle des profondeurs. Tous les sites correspondent à des dépôts récents n'ayant pas ou peu connu d'écoulement par la suite. Les photographies suivantes sont très représentatives des résultats obtenus.

Un tel contraste semble indiquer un arrêt en masse des matériaux sous jacents. Cependant, il est difficile de trouver une explication cohérente avec les observations suivantes :

- imbrication parfaite des galets de surface,
- très faible représentation de ceux ci dans les couches inférieures,
- absence d'érosion marquée dans la zone considérée.

Les mesures sur *l'Infernet* sont en accord avec les résultats obtenus sur le rôle du lavage : la zone remaniée est beaucoup plus riche en éléments d'une dizaine de cm de diamètre, c'est à dire d'une taille intermédiaire.



Figure 7-19 : Comparaison de la couche de surface et des matériaux formant les couches sous jacentes sur la zone de dépôt du *St Vincent*.

Les mesures réalisées sur le *Torrent des Glaciers* sont tracées à la figure suivante :

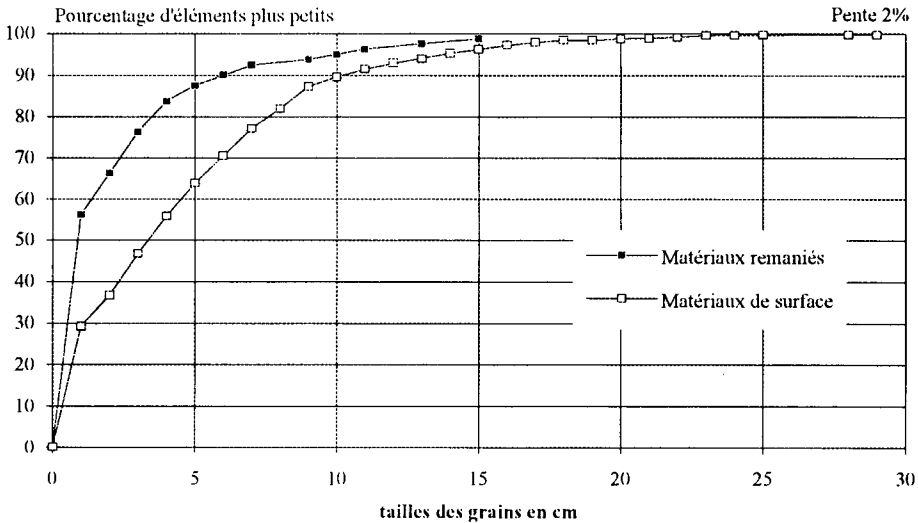


Figure 7-20 : Comparaison des matériaux remaniés avec les matériaux de surface sur le *Torrent des Glaciers*.

La surface se distingue par une sous-représentation des fines et des graviers de moins de 3 cm de diamètre et donc un effectif plus élevé des éléments de taille intermédiaire et supérieure (plus de 4 cm). La principale modification est un glissement de l'ensemble de la courbe granulométrique. Or on considère généralement que le lavage de surface se traduit par une diminution du nombre d'éléments de taille intermédiaire.

En fait, cette situation particulière s'explique par la forte variation locale des débits. En effet, il est probable que les dépôts se produisent durant des fortes crues dont l'essentiel de l'écoulement passe dans cette zone, alors que le pavage est formé sur des bras très secondaires de crues médiocres. Il y a donc une forte disproportion entre la granulométrie en place et la taille des éléments pouvant être déplacés. Ainsi, avec les faibles pentes et les débits réduits s'écoulant localement, ce sont les sables et les graviers qui ont la plus grande sensibilité à l'érosion. Le pavage se distingue alors par le déplacement de ces éléments et non de ceux qui ont une taille intermédiaire par rapport à la granulométrie d'ensemble.

Enfin, le lavage se traduit par une augmentation de la taille des éléments et de l'étendue granulométrique, sur le terrain comme lors des observations sur modèle. De plus, en coordonnées linéaires, les courbes granulométriques se rapprochent de droites sous l'effet de l'écoulement.

Cependant, les particularités géométriques et hydrologiques de chaque torrent - et même de chaque zone - entraînent une grande diversité de comportement et masquent quelquefois cette évolution. Ainsi, il semble vain de vouloir dégager des relations directes et générales entre la granulométrie de surface et celle des couches sous-jacentes.

7.6.3. Reprise dans les terrasses de dépôt

La *Béoux*, en raison de sa morphologie où apparaissent clairement des terrasses de dépôt entaillées par un lit mineur provisoire (donc peu ou pas pavé), a permis une autre approche de l'effet de l'écoulement sur la granulométrie : elle consiste à distinguer l'évolution longitudinale des terrasses (●) de celle du lit mineur (□). Elle conduit aux constatations suivantes :

- Les mesures dans le lit correspondent à un d_{50} légèrement plus faible et moins dépendant de la situation longitudinale de la zone de mesure.
- **Le rapport d_{90}/d_{30}** , montre deux comportements très différents :
 - ♦ pour les mesures dans le lit mineur ce paramètre diminue vers l'aval. La dispersion, relativement importante, reste constante le long du bief.
 - ♦ les mesures sur les terrasses correspondent à des valeurs nettement plus faibles et sont moins sensibles à la situation longitudinale.

Les mesures sur les deux morphologies convergent dans la partie inférieure, au niveau de la zone de dépôt où les divagations du lit sont plus importantes et probablement plus rapides.

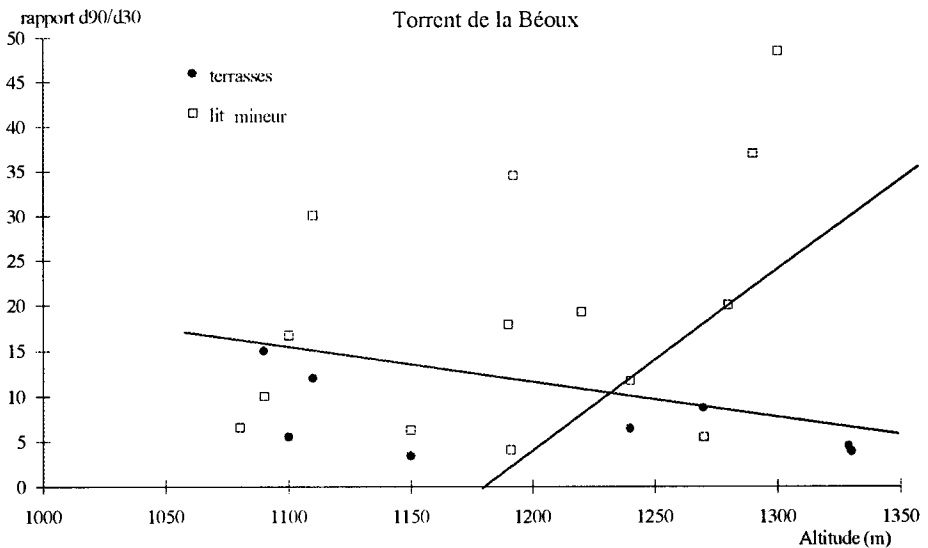


Figure 7-21 : comparaison de l'évolution de l'étendue granulométrique des terrasses avec celle des lits mineurs sur le torrent de la *Béoux*.

Ainsi, il apparaît que le transport solide, dans le lit, augmente l'étendue granulométrique. Les mesures sur les terrasses présentent une plus forte fraction d'éléments de moins de 1 cm, mettant ainsi en évidence le manque de lavage dans ces zones.

Des mesures similaires ont été réalisées sur le *Merdaret*, torrent à laves issu de schistes et affluent de la *Malsanne*. Elles aboutissent à des résultats identiques : le charriage étale la courbe granulométrique du lit et modifie légèrement l'excédent en

fines. Cette dernière caractéristique cache cependant une restructuration du lit, les fines étant regroupées dans des mouilles naissantes.

7.6.4. Structure en marches d'escalier

Comment se forment les structures en marches d'escalier, quelles en sont les caractéristiques, quel rôle ont-elles sur le fonctionnement du torrent?

Des mesures distinguant les seuils et les mouilles ont été réalisées sur trois torrents. En effet, de tels relevés nécessitent une structuration particulièrement nette pour être révélateurs²⁸. D'autre part, une telle structure n'apparaît pas systématiquement dans les lits torrentiels.

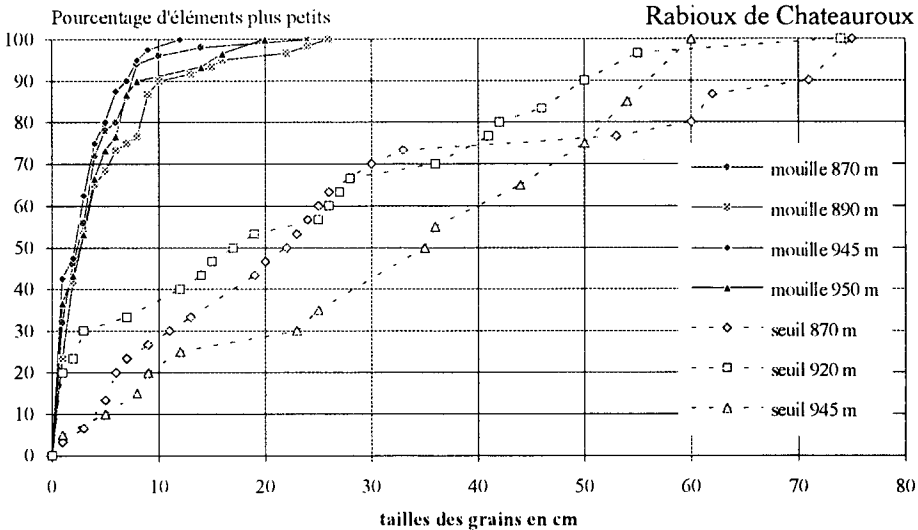


Figure 7-22 : Comparaison de courbes granulométriques de seuil et de mouilles sur le Rabioux de Châteauroux.

Plus que le contraste des valeurs numériques entre les deux éléments morphologiques, on retiendra la différence de forme des courbes. Il apparaît que ces structures, bien que proches et complémentaires, sont très indépendantes :

- dans les seuils, les éléments de toutes tailles prennent place, la répartition des fréquences étant très homogène. On retrouve dans ce cas une forme de courbe proche de celle observée sur modèle après un pavage vigoureux : toutes les classes granulométriques sont représentées dans des proportions comparables²⁹ (la courbe est alors assez proche d'une droite).

²⁸ Il apparaît, en effet, une réelle difficulté pour mesurer le granulométrie d'un seuil de dimension (et donc d'effectif) réduits. De plus, il est nécessaire de pouvoir délimiter nettement chaque structure.

²⁹ Les classes utilisées ici correspondent à une étendue constante (1 cm) au contraire de certaines études qui considèrent plutôt une progression géométrique, plus en rapport avec des représentations semi-logarithmiques des courbes granulométriques.

Ainsi, il semble que les seuils sont esquissés très rapidement. Les observations sur modèle ont montré qu'il s'agit d'un paquet d'éléments plutôt grossiers qui s'arrête brutalement lorsque les contraintes hydrauliques se réduisent et que l'entraide des blocs est suffisante pour qu'ils trouvent appui mutuellement.

Ensuite, il se produit un arrangement de la structure et un arrachement sélectif de quelques grains. Il n'est donc pas surprenant que l'on retrouve une forme de courbe granulométrique proche de celle de l'ensemble du lit sur modèle à la fin du pavage.

- au contraire, les **mouilles** présentent une forte proportion d'éléments fins et une décroissance très rapide du nombre d'éléments grossiers. De plus, la granulométrie est très régulière (elle se rapproche beaucoup d'une loi à trois paramètres).

Il faut noter que cette description correspond à la **surface** des mouilles, car c'est elle qui apparaît lorsque l'on observe le lit, et c'est encore elle qui échange des matériaux avec le transport. Ces explications ne sont valables que pour cette surface, car il est bien évident que les couches profondes des mouilles - qui participent à la structuration du lit - ont des caractéristiques plus proches des seuils, en partie parce qu'elles se sont formées en même temps.

La formation des mouilles semble donc très différente. D'une part, elles sont constituées lors d'écoulements un peu forts mais non exceptionnels. Durant les essais sur modèle, seules les mouilles étaient modifiées dans la phase de lessivage du lit (qui est toujours très longue). De même, il semble qu'elles sont les seules concernées lors d'écoulements assez forts pour déplacer des grains mais trop faible pour modifier la structure du lit.

Il s'agit d'un processus très lent³⁰ où chaque élément bénéficie d'un traitement particulier. Il est donc tout à fait possible que le torrent modifie le couple granulométrie transportée / granulométrie déposée pour obtenir la répartition de taille correspondant le mieux aux conditions d'écoulement.

Ce scénario est confirmé par les mesures réalisées sur des dépôts latéraux sans rapport direct avec une structure en marches d'escalier ou des zones remaniées. Les granulométries de ces zones sont parfaitement homogènes avec celles des mouilles. Ainsi, il s'agit d'éléments morphologiques permettant de réguler le transport solide durant les crues médiocres. Cette remarque est cohérente avec la forte respiration de ces zones de stockage temporaire sur des torrents ou des rivières torrentielles³¹. LISLE & HILTON (1992) ont étudié cet aspect à partir de mesure de terrain (paragraphe 2.7.8).

Pour les deux morphologies, l'excédent en fines est généralement faible. Si ce résultat se comprend bien pour les seuils, il montre que les mouilles ont une composition granulométrique homogène et qu'il ne s'agit pas d'un ajout d'éléments fins de dernière minute.

³⁰ C'est un phénomène quasi permanent, qui se produit entre deux crues suffisantes pour détruire les seuils. Evidemment, certains débits peuvent modifier fondamentalement les matériaux en place dans la mouille. On avait en effet observé que les fluctuations turbulentes étaient à la base de l'arrachement des grains dans les mouilles durant la phase de lessivage.

³¹ Ce point particulier échappe largement au modèle réduit dans la mesure où il s'agit de phénomènes se déroulant sur une longue période avec des écoulements réduits. Ce sont des conditions de fonctionnement qu'il est très difficile de reproduire sur modèle (voir le paragraphe 6.2.2).

La différence de formation explique que les seuils, au contraire des mouilles, soient sensibles aux évolutions longitudinales du lit et à la pente.

Des tentatives de reconstitution de la granulométrie d'ensemble à partir d'une moyenne pondérée des granulométries des seuils et des mouilles permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants dans le cas de la *Cerveyrette* comme du *Rabioux*. La proportion 1/3 de seuil 2/3 de mouille a été obtenue dans les deux cas.

Au contraire, *l'Infernet* montre un changement de comportement à partir du d_{70} . Il n'est alors pas possible d'obtenir un ajustement aussi satisfaisant. Il semble que la pondération doit être modifiée dans le sens d'une augmentation du poids relatif des seuils. La pente de ce torrent étant double des deux précédents, cette constatation n'a rien de surprenant même si elle est trop partielle pour être généralisée.

D'autre part, la comparaison d'un torrent à l'autre des granulométries de chacune des deux zones est très révélatrice : en prenant en compte les courbes moyennes de chaque zone granulométrique on observe que la *Cerveyrette* a les mêmes granulométries que *l'Infernet* alors que la taille des bassins versants, la pente, l'hydrologie, la géologie des deux torrents sont différents.

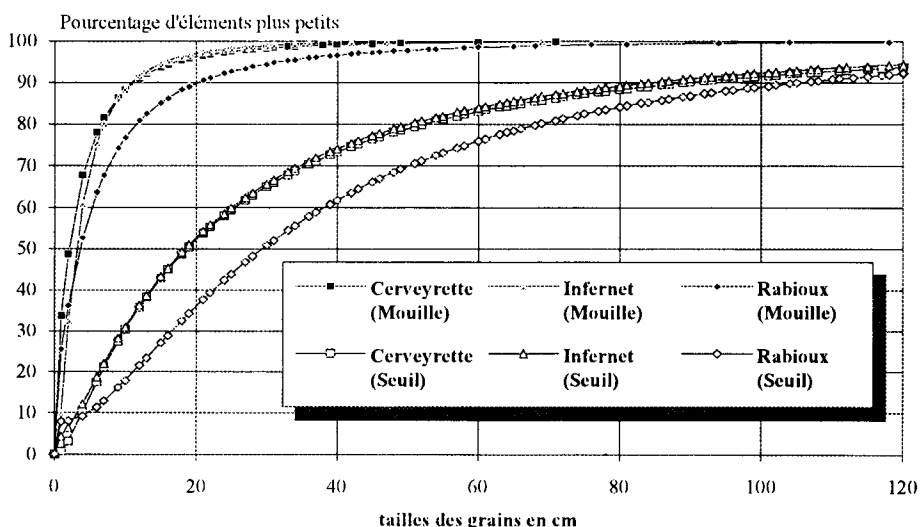


Figure 7-23 : Confrontation des granulométries³² des seuils et des mouilles sur trois torrents.

Cependant, ce résultat remarquable est tempéré par les mesures sur le *Rabioux*. En effet, ce torrent présente pour les mouilles comme pour les seuils des éléments plus gros. Il est difficile de savoir si cette différence met en évidence le caractère exceptionnel de l'identité des granulométries entre *l'Infernet* et la *Cerveyrette* ou si,

³² Pour que le graphique soit plus facilement lisible, les courbes à trois paramètres ont été tracées. Cette présentation ne modifie en rien le résultat et l'étonnante convergence des résultats.

au contraire, il correspond à une particularité du *Rabioux*, c'est à dire d'un reste de rares passages de laves ou de dunes à forte pente.

7.6.5. Mode de transport (lave torrentielle ou charriage)

Est-il possible, uniquement à partir de caractéristiques granulométriques, d'identifier le type de transport solide associé au site de mesure?

C'est seulement sur *l'Infernet* que le transport par lave torrentielle se transforme rapidement en transport par charriage. C'est donc à partir des mesures sur ce torrent qu'il est possible d'étudier l'effet du mode de transport sur la taille des éléments. Il ne s'agit donc que d'une approche très partielle de ce problème.

Il semble intéressant de savoir si la granulométrie permet de distinguer facilement le transport par laves du transport par charriage. Pour répondre à cette question, les expérimentations réalisées sur modèle réduit ne sont que d'une aide relative car les essais conduits ne correspondent qu'à des phénomènes de charriage. De plus, la reproduction sur modèle réduit nécessite deux méthodes très différentes pour reproduire les laves torrentielles et le charriage.

La figure suivante montre le d_{90} en fonction du d_{30} . Les symboles qui figurent chaque point expriment le mode de transport correspondant à chaque zone de mesure :

- zone formée par les laves,
- + mesure d'ensemble (transect longitudinal ou transversal) d'une zone pour laquelle le charriage est un élément prépondérant,
- seuil,
- O mouille,
- indétermination du type de transport solide.

7.6.6. Charriage granulaire hyperconcentré - dunes à forte pente

Quels sont les vestiges du charriage hyperconcentré et des dunes à forte pente sur le terrain?

Quelle est l'influence du charriage hyperconcentré sur le comportement du torrent?

Les essais sur modèle ont mis en évidence les caractéristiques du charriage hyperconcentré^d et d'une structure morphologique particulière qui peut lui être attaché : la dune à forte pente^d (voir paragraphe 6.3.3). Il est donc intéressant de rechercher les traces de tels phénomènes sur le terrain.

Le charriage hyperconcentré se produit à deux échelles très différentes :

- Le "*micro charriage hyperconcentré*" : il s'agit d'un lavage du lit par un écoulement "un peu fort" et capable de déplacer les graviers du lit. Ce processus se produit dans les torrents à l'hydrologie très contrastée (étiage incapable de déplacer des galets) où la crue est rapide et le lit mineur est formé d'une granulométrie relativement resserrée.
- Les phénomènes se déroulant pendant les crues de grande ampleur, et capables de déplacer tous les éléments du lit. Dans ce cas, il n'est guère possible d'observer autre chose que la morphologie ultime après crue. Les études sur modèle réduit montrent clairement le développement de tels processus.

Il semble qu'il s'agit du même phénomène, avec seulement un changement de l'échelle. Cependant, parce qu'il correspond à un débit médiocre, le micro charriage hyperconcentré nécessite des conditions plus nombreuses pour se produire (dans le second cas, un débit exceptionnel est la seule condition nécessaire mais il ne se produit qu'exceptionnellement lors de très fortes crues).

7.6.6.1. Micro charriage hyperconcentré

Il s'agit d'un phénomène facilement observable lors d'écoulements médiocres sur un lit de graviers³³.

Les mesures concernant ce type de transport ont toutes été réalisées sur le torrent de *Rabioux* (affluent de la *Béoux*) car il semble que trois processus distincts s'y déroulent successivement :

1. **Le passage et le dépôt de laves.** Ils se traduisent par la destruction de la morphologie des zones concernées. Les dépôts correspondent à des granulométries très différentes mais toujours resserrées d'une lave à l'autre. Ces matériaux sont peu cohésifs.
2. **le "micro charriage hyperconcentré"**. C'est un écoulement à faible hauteur d'eau, très instable, et qui restructure la couche superficielle (sur une épaisseur de quelques centimètres) lorsque l'écoulement est suffisant.

Il se produit alors un enfoncement général du lit (ce phénomène dure longtemps car le débit liquide nécessaire correspond au transport de grains de taille réduite). Un

³³ Ainsi, il a été possible de l'observer sur les torrents du *Manival* (Isère), du *Boscodon* (Hautes Alpes), Des *Marais* (Savoie)... pour des débits liquides faibles.

cheminement préférentiel se dégage conduisant à une augmentation du pourcentage d'éléments grossiers par tri granulométrique. Ce phénomène fait l'objet de la suite de ce paragraphe.

3. Il apparaît ensuite un pavage sommaire et le phénomène, à cause de l'augmentation de la taille des grains, se rapproche du **charriage ordinaire**³⁴. Il creuse le lit mineur dans le dépôt. Cette évolution correspond à une nette diminution de la concentration en matériaux. Les mesures qui y sont réalisées montrent des éléments de taille relativement importante. Un début de structuration est observable mais les écoulements - irréguliers - n'ont pas le temps de former un lit structuré entre les passages de lave.

Le "micro charriage hyperconcentré" présente les caractéristiques suivantes :

- **Le fonctionnement est le même que celui observé sur modèle réduit dans le cas des dunes à forte pente.** Ainsi, des structures présentant 3 éléments (niche d'érosion amont, chenal central où tous les grains dont le diamètre est inférieur - ou de l'ordre de - la hauteur d'écoulement sont transportés, partie aval correspondant au dépôt d'éléments grossiers).

Les observations de terrain ont clairement montré le caractère transitoire de ces phénomènes, l'écoulement étant déplacé très rapidement d'un côté à l'autre du lit disponible³⁴ pour ce type de phénomène. Ainsi, sur le *Manival*, l'ensemble du lit mineur était balayé par l'écoulement et les grains restaient mouillés en permanence. Il est cependant très difficile de connaître l'origine de ces divagations, chaque dune à forte pente engendrant de fortes variations de débit liquide dans les structures aval, et expliquant ainsi, en partie, les évolutions morphologiques. Ainsi, il est net que le concept de régime permanent, ou même pseudo-permanent, n'est plus du tout adapté pour les phénomènes locaux³⁵.

- Ce type de phénomène ne peut se produire que lorsque **les éléments grossiers sont absents ou très rares.** On désigne par élément grossier les grains qui sont "intransportables³⁶" par les écoulements médiocres correspondant à ce phénomène de "micro charriage hyperconcentré". En effet, lorsque de tels éléments sont trop nombreux, ils forment autant de "points durs" qui ne permettent pas le développement d'une morphologie mobile caractéristique du charriage hyperconcentré mais au contraire qui figent le tracé du lit. Il s'y produit alors un "pavage", le charriage hyperconcentré ayant une capacité de transport suffisante pour creuser un chenal dans les matériaux transportables jusqu'à accumuler assez de galets résistant à la mise en mouvement.

³⁴ En effet, seul le lit mineur **correspondant aux crues précédentes** est généralement concerné par ce type de phénomène. On verra par la suite que seule une zone de granulométrie relativement resserrée (par rapport à l'ensemble du lit) peut permettre le développement d'un tel phénomène. Il se produit donc dans un dépôt homogène pouvant être affecté par les crues de faible ampleur.

³⁵ Si le régime permanent est encore adapté pour l'ensemble du lit, celui de régime uniforme ne l'est plus. Le régime permanent n'est alors plus valable localement.

³⁶ On avait vu sur modèle que, lors du charriage hyperconcentré, les grains qui ne sont pas déplacés (ou qui le sont de façon exceptionnelle) doivent avoir un diamètre nettement supérieur à la hauteur de l'écoulement.

Cette condition d'absence de blocs "non transportables" (moins de 5 à 10 cm dans les torrents observés³⁷) par des écoulements médiocres est rarement rencontrée dans les torrents fonctionnant par charriage, car les dépôts présentent généralement une grande étendue granulométrique. C'est donc essentiellement dans les torrents à lave que l'on peut observer le charriage hyperconcentré en dehors des crues³⁸.

- D'autre part, **les éléments fins** (moins de 1 à 3 mm dans les torrents observés) **sont facilement transportés et évacués** de la zone caractéristique de ce type de transport³⁹. Ainsi, la structuration verticale des dépôts montre que la couche supérieure (concernée par le charriage hyperconcentré) est débarrassée des éléments fins.
- **Les phénomènes d'infiltration ont un rôle majeur**. En effet, le débit unitaire est réduit (hauteur de l'écoulement limitée à quelques cm) et l'absence de fines permet un écoulement important sous la surface. Cette infiltration est évidemment beaucoup plus importante dans la zone aval des dunes à forte pente (zone de dépôt des éléments grossiers), d'une part à cause de l'augmentation de pente mais aussi parce que la granulométrie y est plus grossière. C'est elle qui participe grandement à la caractéristique exposée au paragraphe suivant.
- **Le charriage hyperconcentré facilite probablement la transformation en lave torrentielle**. Ainsi, on a pu observer (en particulier sur le torrent du *Marais - Savoie*) une remise en mouvement en masse de la zone de dépôt temporaire d'éléments grossiers en partie sous l'effet des écoulements interstitiels. Le transport solide présente alors les mêmes caractéristiques que les laves torrentielles, et il est probable que ce phénomène soit couramment rencontré dans les torrents où des laves se forment dans le chenal⁴⁰ à la suite de charriage.

L'observation des torrents en aval de la station des *Arcs* (Savoie) montre que généralement le passage du charriage au transport par lave se produit progressivement et que l'on observe d'abord un lit où aucune lave ne s'est produite durant la crue. Ensuite, il apparaît une zone où la morphologie est complexe et où il est difficile de trouver des indices permettant de déterminer le phénomène de transport de façon fiable. Enfin, plus en aval, les traces de passage de laves sont sans équivoques. Il semblerait, au vu des "micros charriages hyperconcentrés" observés sur le terrain, que cette transition se produit quelquefois par mise en mouvement de la partie aval d'une dune à forte pente.

³⁷ Cette caractéristique est très dépendante de la hauteur d'eau et donc du débit liquide dans le torrent.

³⁸ Il s'agit donc de laves présentant une granulométrie resserrée sans éléments de plus de 10 cm mais avec une fraction très réduite d'éléments fins (moins de 1 mm). Ce type de phénomène n'apparaît que dans quelques torrents à laves spécifiques, pour lesquels la dernière crue a engendré une lave répondant à ces critères particuliers.

³⁹ Cette constatation, apparemment contradictoire avec les observations sur modèle réduit (ou les éléments fins ne disposent pas d'une mobilité particulièrement élevée), s'explique par la très faible taille des éléments fins considérés ici et par les écoulements interstitiels qui ne peuvent pas se produire avec les granulométries utilisées sur modèle dans des proportions aussi importante que pour ce phénomène particulier.

⁴⁰ Il est en effet toujours délicat d'expliquer le passage d'un phénomène globalement continu (charriage) à un phénomène par bouffée (lave torrentielle). La formation d'embâcle est probablement une réponse, mais elle est sans doute partielle car il est finalement assez rare d'en observer des traces dans les chenaux d'écoulement.

Finalement, ce type de transport ne peut se produire que dans le cas d'une granulométrie *relativement* resserrée⁴¹ autour d'éléments de quelques mm à quelques cm de diamètre. C'est lui qui est responsable de l'identité de la partie fine des granulométries des lits correspondant au charriage ordinaire et au charriage hyperconcentré sur le torrent de *Rabioux* :

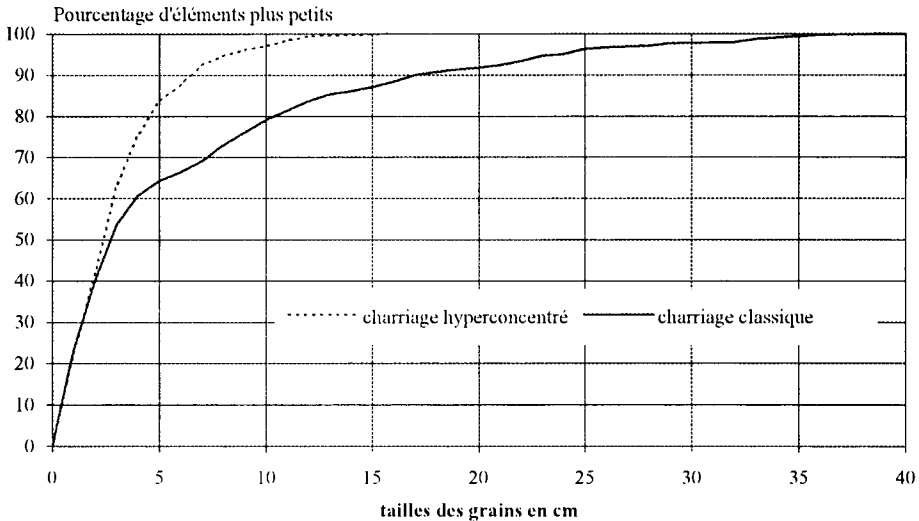


Figure 7-25 : Confrontation de la granulométrie du charriage ordinaire et du charriage hyperconcentré sur le torrent de *Rabioux* (affluent de la *Bécoux*).

Le "micro charriage hyperconcentré" se présente donc comme un phénomène ne pouvant apparaître que lorsque la granulométrie locale est assez resserrée pour n'inclure qu'un très faible pourcentage d'éléments "intransportables" par les écoulements médiocres dans le torrent, et une fraction réduite d'éléments fins capables de rendre le mélange cohésif.

Il semble qu'en présentant des matériaux déstructurés et de taille réduite, les restes de micro charriage hyperconcentré n'offrent aucune résistance lorsque le débit augmente. Ils n'ont donc pas de rôle significatif sur le comportement du torrent.

⁴¹ Il s'agit d'une caractéristique relative par rapport à l'ensemble du lit majeur et on observe, finalement, une étendue granulométrique du même ordre que celle des modèles réduits avec un rapport d_{90}/d_{30} de l'ordre de 10.

7.6.6.2. Morphologie après les fortes crues

On a vu au chapitre 6 que la formation de dune à forte pente - sur modèle réduit - nécessitait toute une série de conditions (géométriques, granulométriques, hydrauliques...) qui expliquent que ces structures peuvent rarement se développer pleinement et qu'elles restent souvent à un état embryonnaire.

De plus, il est probable que les torrents pour lesquels se produisent ces phénomènes connaissent aussi - exceptionnellement - des laves torrentielles, d'une part à cause de la vigueur des conditions hydrauliques, de l'importance de la fourniture en matériaux solide mais aussi, comme on l'a vu précédemment, parce que la dune à forte pente peut faciliter la formation de lave torrentielle dans le lit.

Ainsi, seuls deux torrents ont permis de mettre en évidence ces traces morphologiques :

- Le **Claret**, torrent à clappe qui rejoint l'Arc peu en amont de *St Jean de Maurienne* (Savoie). Dans ce cas, le phénomène prépondérant est le transport de laves torrentielles. Cependant, il a été possible d'observer, immédiatement après les crues du printemps 93, des traces de charriage hyperconcentré, matérialisées par des restes de dunes à forte pente d'une dizaine de mètres de longueur⁴². Par manque de temps, aucune mesure n'a pu être réalisée. Il faut noter que ce phénomène correspond à une fin de crue, une lave s'étant vraisemblablement produite peu avant.
- Le **Rabioux de Châteauroux**, qui a été l'objet de mesures. Il semble que des dunes à forte pente ont pu se développer dans la partie centrale du cône de dépôt. On peut y reconnaître les restes de structures de quelques dizaines de mètres de longueur et de quelques mètres de hauteur⁴³.

La photo suivante montre la partie aval d'une dune à forte pente avec un dépôt d'éléments grossiers (pratiquement débarrassé d'éléments fins). On peut considérer que le dépôt d'éléments très fins en aval correspond à la partie centrale d'une autre dune à forte pente.

⁴² Ces observations, réalisées sur le cône de dépôt correspondent à un lit très encaissé d'une dizaine de mètres de large. Ainsi, l'écoulement (dont la largeur correspondant au charriage hyperconcentré n'excédait pas 2 à 3 mètres) n'était pas totalement libre de développer des structures nettement tridimensionnelles.

⁴³ Il est difficile de savoir si ces dimensions correspondent à des caractéristiques générales sur le cône ou si c'est seulement la taille des éléments les plus facilement repérables. En effet, il s'agit des restes de crues assez anciennes (probablement celle du 16 Novembre 1963). La végétation s'est donc développée et il est difficile de prendre assez de recul pour observer des structures de grande taille.



Figure 7-26 : Reste probable d'une dune à forte pente sur le cône de dépôt du *Rabioux*.

On peut ainsi observer que ce type de morphologie entraîne, comme on l'avait observé sur modèle, un resserrement de la granulométrie transportée par stockage des éléments fins et surtout grossiers.

D'autre part, on observe, même sur des structures de taille relativement réduite, que le niveau du lit s'élève dans des proportions bien supérieures à la hauteur d'eau⁴⁴. Il est intéressant de noter que tous les restes de dune à forte pente sont situés dans des zones très éloignées de l'écoulement actuel, montrant ainsi que des crues moyennes (ou la fin de la crue formatrice) sont probablement capables de remanier ces restes de charriage hyperconcentré⁴⁵. La relative facilité de destruction de ces structures s'explique par le fort contraste granulométrique (il est facile d'amorcer une érosion régressive à partir d'une zone d'éléments fins puis, d'arracher progressivement tous les éléments grossiers du dépôt aval). D'autre part, la rapidité de construction de ces éléments (et en particulier de la zone de dépôt aval) montre que l'écoulement n'a pas eu le temps de structurer cette zone.

⁴⁴ On verra lors de l'étude hydrologique (paragraphe 7.7) que la hauteur d'eau est de l'ordre de 80 cm pour une crue décennale, et qu'elle dépasse 1.20 m en un seul point.

⁴⁵ Ainsi, les périodes où ces structures étaient les plus visibles sur modèles correspondaient à la période de fort transport solide. Ensuite, les écoulements secondaires gommaient peu à peu ces particularités. Cette disparition rapide des restes morphologiques explique en partie que ces structures morphologiques soient encore si mal connus.

7.6.7. Carte de granulométrie

Il s'agit d'une zone d'une étendue relativement faible sur laquelle les prélèvements pour la détermination de la granulométrie sont réalisés à un pas d'espace faible et régulier. Un codage de la morphologie est réalisé de la même façon.

L'objectif est de savoir si pour une échelle plus réduite, les tendances précédentes sont encore valables et si il est possible d'éviter le caractère arbitraire du choix de la zone de mesure, comme lorsque l'on détermine la granulométrie à partir de la définition d'une structure morphologique.

Les résultats de cette approche sont détaillés à l'annexe VI.

Dans l'ensemble, on retrouve sur cette surface réduite soumise à de faibles écoulements les mêmes phénomènes que pour l'ensemble de la zone de dépôt. Il y aurait donc bien "similitude" entre le fonctionnement de ces secteurs très secondaires de quelques centaines de m² et le comportement de la zone de dépôt étendue sur quelques km².

7.7. Hydrologie

7.7.1. Objectifs

Il s'agit, à l'aide d'une étude hydrologique sommaire, de comparer les conditions hydrauliques locales à la granulométrie. Cette confrontation est basée sur :

- **le diamètre maximal des grains pouvant être transportés en suspension.** Il s'agit de mieux cerner la séparation entre suspension et charriage.
- **le seuil de début de mouvement des grains.** Cette approche est particulièrement destinée à déterminer quel décile est le plus représentatif de l'ensemble des matériaux.

7.7.2. Paramètres retenus

Les débits suivants ont été retenus car ils semblent représentatifs des différentes périodes de fonctionnement du torrent :

- **module inter-annuel.**
- **plus fort débit mensuel moyen.** Ce paramètre est destiné à prendre en compte l'effet des écoulements tels que ceux correspondant à la fonte des neiges qui restructurent en détail le lit.
- **crue bi-annuale.** Elle caractérise les débits capables de remanier le lit sans en détruire les éléments structurants.
- **crue décennale.** Il s'agit là d'appréhender les fortes crues pouvant bouleverser l'ensemble du lit.

Les crues de temps de retour plus élevé ont probablement un rôle considérable dans la morphologie "à grande échelle" du torrent mais influent peu sur les caractéristiques morphologiques locales, prises en compte ici car elles sont probablement rapidement "gommées" par des crues plus fréquentes.

La détermination hydrologique du débit est réalisée en considérant les bassins versants proches⁴⁶ et jaugés. L'extrapolation est réalisée ensuite en considérant la surface du bassin versant à la puissance 0.9 (car il s'agit de petites surfaces).

L'étude hydrologique et le calcul des paramètres hydrauliques locaux sont détaillés à l'annexe V.

⁴⁶ Il s'agit d'une proximité plus hydrologique que géographique. Il est en effet indispensable, en montagne, d'apporter la plus grande attention aux variations de la pluviométrie en fonction du relief, en particulier à proximité de la frontière Franco-italienne et du massif du Mont Blanc.

7.7.3. Corrélations avec les paramètres granulométriques

7.7.3.1. Approche globale

Les débits liquides représentatifs de chaque torrent ont été confrontés dans un premier temps aux paramètres granulométriques. Cependant, aucun lien significatif ne peut être pris en considération : l'influence du débit liquide est noyée par les variations des caractéristiques des différents torrents (pente, surface du bassin versant, débit liquide...).

Finalement, les débits comme la superficie du bassin versant ne sont pas corrélés avec la taille des grains. Il semble qu'il s'agit de paramètres trop globaux pour être pris en considération, en particulier à cause des variations de largeur de l'écoulement.

Il a donc été nécessaire de calculer les conditions hydrauliques locales (pente et hauteur d'eau) à partir d'hypothèses sur les pertes de charge et la largeur de l'écoulement (voir annexe V).

7.7.3.2. Transport en suspension

La taille maximale des éléments en suspension est, dans presque tous les cas, inférieure à 1 cm. Ainsi, pour une crue décennale, 95% des valeurs sont comprises entre 1 et 7 mm⁴⁷ :

⁴⁷ Ce calcul est fait en considérant une largeur égale à 18 fois la hauteur de l'écoulement. Dans le cas d'une largeur indépendante du débit, les conditions hydrauliques sont un peu plus sévères et la taille des grains est légèrement augmentée : la moyenne des diamètres augmente alors de 9 % par rapport aux calculs réalisés avec une largeur variable.

Le calcul est réalisé en égalant la vitesse de frottement U_* et la vitesse de chute exprimée par :

$$w = \sqrt{\frac{10gd_{s0}}{3} \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \quad (\text{voir annexe V}).$$

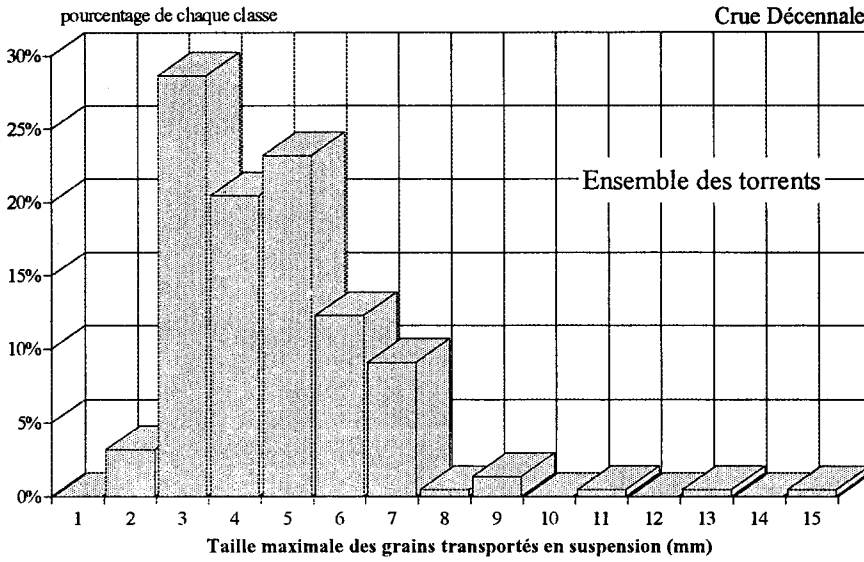


Figure 7-27 : Diamètre des grains pouvant être transportés en suspension au cours d'une crue décennale.

Il semble alors tout à fait légitime de considérer que seule la classe des éléments de moins de 1 cm est partiellement transportée en suspension.

Si l'on considère l'évolution en fonction du temps de retour, pour une largeur égale à 18 fois la hauteur, il est net que le diamètre des éléments en suspension augmente avec le débit. Cependant, la répartition de taille des éléments varie suivant le temps de retour. Il faut y voir l'effet des particularités hydrologiques de chaque torrent.

7.7.3.3. Diamètre correspondant à la contrainte critique de cisaillement

Il s'agit du diamètre correspondant à la valeur critique du paramètre de Shields. Cette valeur est directement proportionnelle à la contrainte de cisaillement. Il semble intéressant de la comparer au d_{50} , l'ensemble des grains ayant une mobilité proche de celle du diamètre médian.

D'autre part, plusieurs études ont indiqué que le diamètre moyen d_m était plus représentatif de la mobilité d'un mélange de granulométrie étendue (voir paragraphe 2-6). Ainsi, la figure suivante montre les deux paramètres en fonction du diamètre critique de début de mouvement.

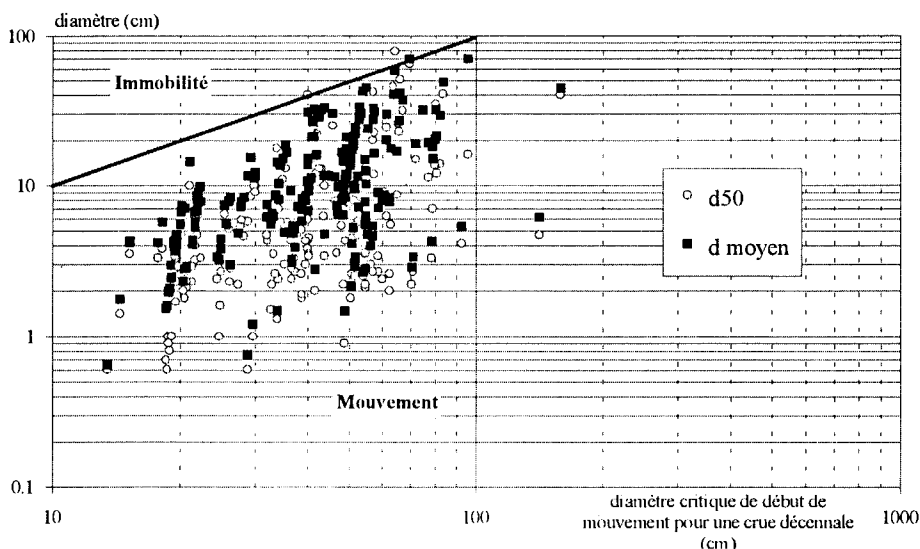


Figure 7-28 : Comparaison du d_{50} et du diamètre moyen d_m avec le diamètre critique de début de mouvement pour une crue décennale.

Même si la dispersion reste importante (une décade), contrainte de cisaillement et granulométrie sont directement liées. Ainsi, plus les conditions sont sévères, plus les éléments du lit sont grossiers.

Ce graphique indique aussi que les points correspondant au diamètre moyen sont plus proches de la bissectrice. Cependant, il n'est pas possible de savoir si cette amélioration correspond à une réalité physique ou s'il s'agit plutôt d'un effet, mécanique, le diamètre moyen - plus grand que le d_{50} - conduisant automatiquement à un meilleur résultat dans ce cas.

Il apparaît d'autre part que l'écart entre les résultats obtenus en considérant l'un ou l'autre des deux paramètres est relativement peu réduit par rapport à la forte dispersion naturelle.

D'autre part, il semble que les déciles (en particulier le d_{30}) augmentent plus vite que le diamètre limite de début d'entraînement. Cependant, pour une crue décennale, le d_{50} est toujours inférieur au diamètre limite pour la crue décennale, sauf pour 3 seuils présentant un d_{50} proche de la valeur critique.

Cette figure correspond à une section de proportions constantes mais la prise en considération d'une largeur indépendante du débit ne modifie par sensiblement le graphique.

La figure suivante relie le diamètre critique de début de mouvement pour le débit moyen inter-annuel au d_{50} :

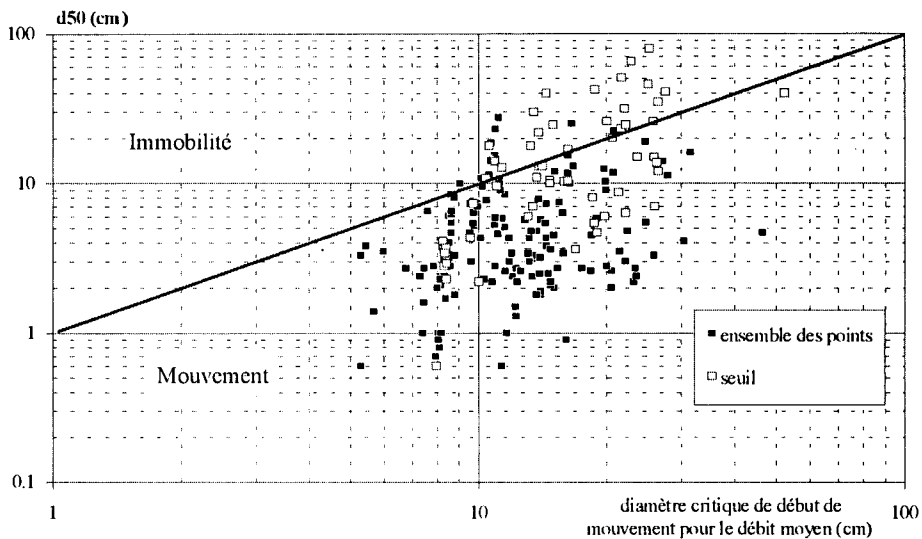


Figure 7-29 : Comparaison du d_{50} au diamètre critique de début de mouvement pour le débit moyen inter-annuel.

Il apparaît qu'à part les seuils, l'ensemble des zones sont mises en mouvement pour le débit moyen. Ce calcul fournit donc des résultats contraires à l'observation. Il semble possible d'en tirer les conclusions suivantes:

- lorsque la pente augmente, la contrainte de cisaillement nécessaire au déplacement des grains est supérieure à celle de Shields. Celui-ci avait déjà remarqué un changement de comportement autour de 1% de pente.
- le pavage réduit probablement considérablement la mobilité des éléments. Cependant, il n'est pas apparu de corrélation entre le rapport du diamètre limite de départ des matériaux sur le d_{50} et l'indice de lavage. Ainsi, contre toute attente, il ne semble pas que les zones lavées sont plus résistantes aux conditions hydrauliques calculées ici, par application du critère de Shields.

Enfin, pour tenir compte de l'effet du pavage, on substitue souvent le d_{90} au d_{50} dans l'application des formules. La figure suivante montre qu'une forte majorité des éléments "structurants" (seuils mais aussi transects longitudinaux et transversaux) sont suffisamment grossiers pour supporter une crue décennale). Au contraire, les morphologies de "remplissage" (mouilles, dépôts) ne peuvent résister à l'érosion.

Pour un écoulement correspondant au débit moyen annuel, ce sont uniquement les structures de remplissage qui sont susceptibles d'être érodées.

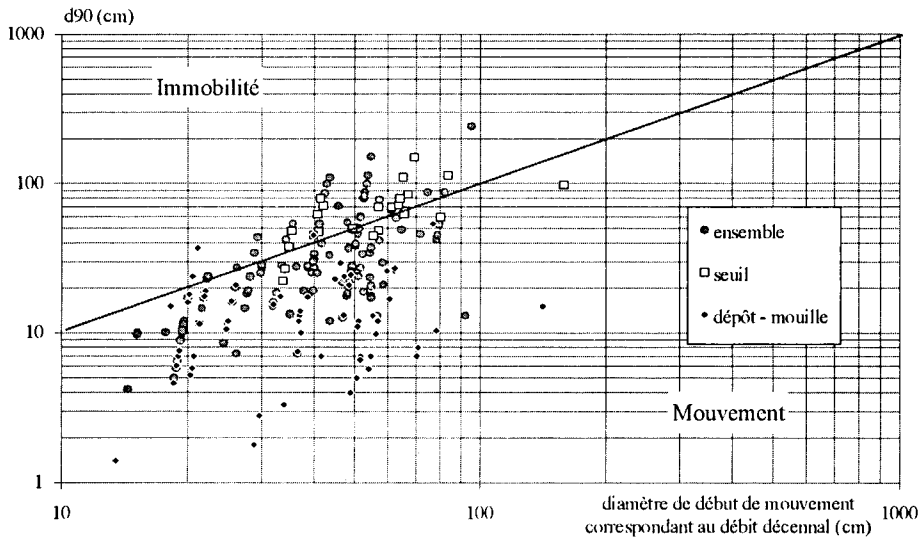


Figure 7-30 : Comparaison du d_{90} au diamètre critique de début de mouvement pour une crue décennale

Ainsi, l'utilisation du d_{90} permet de coller nettement mieux à la réalité que celle du d_{50} . Cependant, cette évolution "dans le bon sens" ne prouve pas que la stabilité d'une zone dépend du décile supérieur mais montre seulement que la prise en compte de ce dernier permet d'obtenir des résultats plus plausibles, de la même façon qu'un coefficient multiplicatif appliqué sur la contrainte de début d'entraînement.

C'est ainsi que PARKER & KLINGEMAN (1982) ont redéfini les seuils de début de mouvement pour une granulométrie étendue. Il considère toujours le d_{50} pour le calcul de τ_* mais définissent deux seuils :

- $\tau_* < 0.0876$ aucun mouvement
- $0.0876 < \tau_* < 0.138$ quelques grains sont mis en mouvement. Le phénomène correspond au charriage ordinaire^{ph} défini précédemment
- $0.138 < \tau_*$ le pavage et détruit et toutes les tailles de grains sont déplacées.

On peut donc, en modifiant le choix des paramètres granulométriques ou la valeur des seuils de début de mouvement, avoir des résultats cohérents avec les observations. Il semble cependant, que l'approche utilisant le d_{90} est préférable car elle permet de mieux prendre en compte l'étendue granulométrique.

Cependant, il semble qu'il est nettement préférable de réaliser une étude comparative des différentes zones morphologiques, plutôt que de prévoir un comportement "absolu" des matériaux à partir des formules classiques de début de mouvement.

Un tel travail a été réalisé sur la *Guisane* (Hautes-Alpes) par BESNARD (1993) et a montré une bonne correspondance entre les formules et les observations quant à la résistance relative des différentes portions du lit à l'écoulement. Cette démarche est caractéristique de l'application des formules aux études de cas.

7.8. Mesures dans le cadre d'une étude de cas

7.8.1. Introduction

Les granulométries de terrain étant très différentes d'un point à un autre, nous allons tenter de savoir laquelle doit être mesurée dans le cadre d'une étude déterminée. Il est de toute façon inutile de chercher à avoir une valeur "moyenne" du secteur valable pour tous les phénomènes.

En effet, chaque mesure correspond à une structure morphologique et éventuellement à un comportement particulier. Il peut donc y avoir, en un même point, plusieurs granulométries différentes, représentatives chacune d'un phénomène particulier. L'objectif de ce travail est donc d'associer une zone de mesure aux besoins qui peuvent être rencontrés dans une étude.

On verra, cependant, que dans certains cas, les zones de mesure géométriques (définies au paragraphe 7.3.3) peuvent fournir des résultats satisfaisant, par exemple à la détermination des la granulométrie d'ensemble.

Le site de mesure doit être le plus "pur" possible et en rapport avec la morphologie recherchée. Etant donnée l'importance des variations longitudinales, il est indispensable de réaliser les mesures à l'endroit où elles doivent être utilisées. Il est donc indispensable d'accorder la plus grande attention aux points suivants :

- Il faut que le point de mesure soit éloigné des versants afin qu'aucun élément - sans rapport avec la dynamique - ne soit susceptible d'en provenir directement.
- Un autre obstacle est la détermination du type de transport. En effet, même les torrents qui transportent l'essentiel de leurs matériaux par charriage peuvent connaître, lors d'événements exceptionnels, un transport par lave torrentielle dont les caractéristiques sont nettement différentes. Or, souvent, le charriage est impuissant à en effacer les traces, même pour des laves très anciennes.
- De plus, il est important de bien cerner les limites de la zone morphologique. Si ce problème est capital pour les seuils, il garde toute son importance pour des dépôts dont les caractéristiques évoluent tantôt rapidement, tantôt progressivement.

D'autre part, il est indispensable, pour mieux cerner l'erreur de mesure, de réaliser à chaque fois au moins deux mesures *a priori* équivalentes. De même, pour les zones de faible superficie (seuil), il est préférable de faire des mesures dans plusieurs secteurs plutôt que de "sur-échantillonner" une seule structure.

7.8.2. Méthode d'obtention des caractéristiques d'ensemble

Il s'agit de savoir comment déterminer la granulométrie d'ensemble^{el} de la zone étudiée (par exemple pour une étude sur modèle réduit).

Des mesures ont été réalisées sur la plate-forme torrentielle au cours des essais concernant le torrent du *St Vincent*. Il est apparu que la mesure de transects transversaux, barrant l'ensemble du lit majeur^{el}, conduisait à une bonne estimation de la granulométrie du torrent. La figure 6-17 montre les différentes granulométries mesurées.

La figure suivante compare la granulométrie des transects à celles utilisées pour le matériau du lit - d'une part - et pour le matériau injecté en amont - d'autre part :

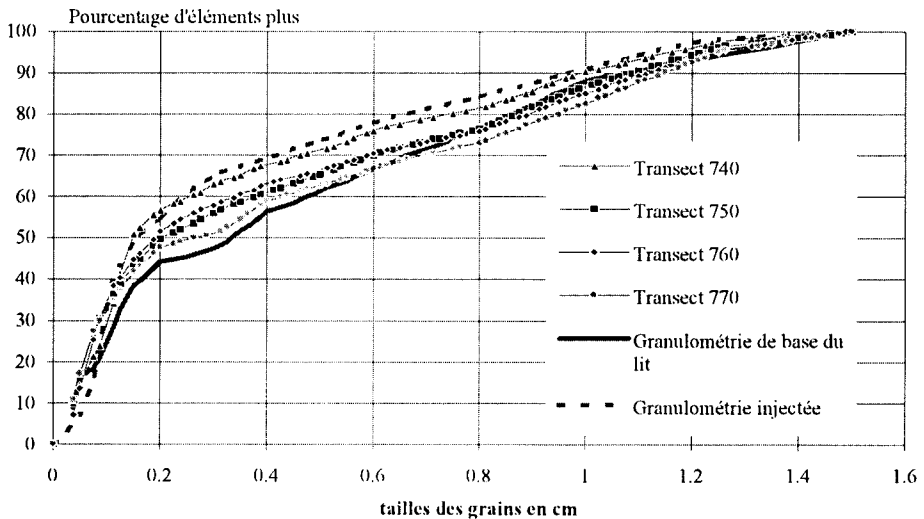


Figure 7-31 : Confrontation des granulométries de surface du lit majeur avec celles des matériaux employés pour le fonctionnement du modèle durant les essais sur le *St Vincent*.

Dans le cas précis des essais du *St Vincent*, la granulométrie d'ensemble n'est pas connue avec précision car celle du lit et celle des matériaux injectés ont été distinguées pour se rapprocher de la réalité. Cependant, elle est probablement située entre ces deux valeurs : c'est bien ce que montrent les courbes précédentes.

Il faut cependant noter que la surface du lit contient un excès de matériaux grossiers : cette constatation est tout à fait conforme au fonctionnement d'une zone de dépôt au cours d'une crue.

Les mesures sur le torrent du *Rabioux*, où des transects ont été systématiquement relevés, permettent d'avoir une estimation de l'incertitude (figure 7.7).

Il apparaît que même si les granulométries sont relativement proches, la dispersion reste considérable puisque le d_{50} est compris entre 6 et 15 cm alors que le d_{90} est dans la fourchette 30 à 53 cm. Dans ce cas, l'incertitude est probablement accrue par les restes de dunes à forte pente.

On constate, sur cet exemple, qu'il n'est pas possible de faire abstraction des particularités morphologiques du torrent, même dans le cadre de mesures systématiques visant un paramètre moyen sur une zone de dépôt.

Finalement, la mesure de la granulométrie dans le lit majeur est probablement la plus représentative de la granulométrie d'ensemble (que se soit par des transects longitudinaux ou transversaux), mais il est nécessaire de toujours avoir une vue d'ensemble du fonctionnement du torrent pour connaître la signification des mesures réalisées.

7.8.3. Méthode d'obtention de granulométries particulières

7.8.3.1. Conditions d'écoulement - pertes de charge

Dans le cas des torrents, la notion de "gros éléments de rugosité" semble prépondérante. Il s'agit alors de déterminer les zones qui participent le plus aux pertes de charges pour le débit retenu⁴⁸. Il faudra mesurer la granulométrie de surface de la zone considérée en attachant une attention particulière aux éléments cassant l'énergie de l'écoulement. D'autre part, il est indispensable, dans une étude, de prendre en considération la rugosité de forme (comme des seuils par exemple) qui jouent un rôle prépondérant à certains régimes.

7.8.3.2. Stabilité du lit

Il semble qu'il y a, surtout pour les torrents sans lave, deux sortes d'éléments morphologiques :

- **les éléments structurants** qui sont responsables de la stabilité et de la position du lit. Leur résistance est variable mais est suffisante pour des crues de faible temps de retour. Ils correspondent au pavage. Une mesure destinée à connaître la résistance du lit devra prendre en compte uniquement ces éléments⁴⁹.
- **les éléments de "remplissage"** du lit. Ils ont un comportement beaucoup plus chaotique car il s'agit généralement de zones formées lors de conditions hydrauliques très différentes. Elles ont généralement peu de liens avec les caractéristiques locales (pente, largeur du lit, situation longitudinale...). Leur rôle est essentiellement de réguler les variations de transport solide. Ces zones sont évidemment entièrement modifiées durant les périodes de crues. Les mouilles ou les dépôts latéraux correspondent à cette définition.

7.8.3.3. Débit solide

La granulométrie transportée n'est pas mesurable sur le terrain mais on sait qu'elle est extrêmement variable en fonction du temps. Elle est théoriquement indispensable au

⁴⁸ On voit ici les limites de cette approche : il n'est en effet possible d'étudier les pertes de charge à partir de mesures granulométriques que dans la mesure où le lit reste fixe, c'est à dire pour des débits réduits... pour lesquels la connaissance des conditions d'écoulement présente généralement peu d'intérêt.

Au delà, les divagations commencent et le transport solide ainsi que les modifications du lit deviennent prépondérants pour expliquer les conditions d'écoulement (les chapitres 4 à 6 ont nettement montrés les limites des approches classiques). Il est alors vain de vouloir connaître les conditions d'écoulement à partir des paramètres granulométriques et géométriques du lit "au repos".

⁴⁹ Il faut cependant s'assurer qu'ils sont assez bien agencés pour qu'il n'y ait pas de risque d'érosion régressive car alors la quasi totalité des structures morphologiques est emportée. Cette condition est largement liée à l'âge et à l'historique du pavage.

calcul du débit solide⁵⁰ et sa connaissance serait nécessaire à l'approche précise du transport solide.

On a vu qu'il était possible - pour certains torrents - de déterminer les zones fournissant les matériaux et d'en déduire la granulométrie transportée (comme cela a été fait sur le *S^t Vincent* et le torrent de *Bonnegarde*).

On peut aussi utiliser le fait que (comme on l'a vu au cours des essais sur modèle réduit) la granulométrie du lit majeur⁴⁸ est proche de la granulométrie d'ensemble abordée au paragraphe précédent. On peut donc utiliser les mêmes méthodes que celles proposées au paragraphe précédent.

Cependant, pour des écoulements relativement réduits, il n'est plus possible de faire de telles hypothèses et il n'y a plus d'influence directe de l'écoulement sur la granulométrie transportée. Dans ce cas, seule une quantification précise des matériaux disponibles pour un lessivage⁴⁹ permet d'estimer la nature des matériaux transportés. Cependant, comme dans le cas des conditions hydrauliques, il faut noter que la connaissance des caractéristiques du transport solide pour des écoulements relativement réduits présente généralement peu d'intérêt dans le cadre d'une étude de cas.

7.8.4. Conclusion

La mesure de la granulométrie sur le terrain est une étape indispensable dans le cadre d'une étude de cas. En effet, la granulométrie du lit est révélatrice des épisodes passés et à venir dans le torrent. Elle est donc essentielle pour en prévoir le fonctionnement.

Cependant, son utilisation est difficile car c'est un paramètre très sensible aux conditions extérieures. Ainsi, chaque particularité morphologique en modifie grandement les caractéristiques. Cette sensibilité est à double tranchant : elle en fait un outil d'analyse extrêmement puissant, mais en complique excessivement l'approche car il devient difficile d'obtenir une mesure représentative.

Cependant, il a été possible de dégager que la granulométrie du lit majeur, mesurée à l'aide de transects longitudinaux ou transversaux était bien représentative de la granulométrie d'ensemble⁴⁸ du lit. De même, la granulométrie du lit mineur peut fournir une bonne image des conditions hydrauliques durant des écoulements médiocres et indiquer "l'âge" et la résistance du pavage.

De même, les seuils renseignent sur la solidité locale du lit alors que les mouilles ou les dépôts latéraux sont révélateurs de la granulométrie transportée lors des derniers écoulements significatifs.

⁵⁰ En fait, la plupart des études prennent en considération la granulométrie de base du modèle et non pas la granulométrie transportée. Cet écart est cependant peu significatif dans le cadre des essais sur modèle réduit concernant des crues extrêmes car le tri granulométrique est réduit. Cependant, les modélisations les plus poussées actuellement distinguent les deux granulométries. La granulométrie transportée est alors obtenue par calage. Sur le terrain, il y a probablement une différence importante, même dans le cas d'une crue importante. On a vu cependant au chapitre 4 que les résultats obtenus en utilisant la granulométrie du lit conduisaient à des résultats plutôt meilleurs. Ainsi, l'utilisation de la granulométrie transportée ne se justifie que dans le cadre de phénomènes bien délimités comme le charriage partiel de matériau provenant de l'amont sur un lit fixe (pour les écoulements considérés).

Malgré tout, il faut veiller à ne pas utiliser directement les mesures granulométriques sans en faire une critique systématique par rapport à la morphologie d'ensemble du torrent. C'est généralement le seul moyen de donner une cohérence et une signification aux mesures réalisées. Une approche "aveugle" conduit presque systématiquement à des contresens dans l'utilisation des granulométries.

7.9. Conclusion

On a vu que pour extrapoler au terrain des observations sur modèle réduit on rencontre trois difficultés distinctes :

- L'enchaînement d'écoulements plus ou moins vigoureux complique grandement la morphologie d'un lit torrentiel naturel. Cette diversité est accrue par la variation de fourniture en matériau par le bassin versant.
- Le changement d'échelle explique la différence entre les phénomènes observés indépendamment de tout problème de similitude (étant donnée l'importance du rapport d'échelle qui est couramment compris entre 50 et 100).
- Le modèle permet de suivre la dynamique des phénomènes alors que le terrain n'autorise, en général, que l'observation du résultat final.

Ce "triple saut" explique un changement de méthode par rapport à l'étude des phénomènes sur modèle : l'objectif n'est plus de dégager des règles à partir de mesures mais plutôt d'expliquer les particularités des observations afin de tester la validité et la robustesse des connaissances établies.

Cette approche a montré l'importance considérable des liens entre morphologie et granulométrie et la difficulté de faire des mesures significatives. La dynamique torrentielle devant toujours être mise en évidence à partir d'une interprétation morpho-dynamique du lit. La figure suivante montre la difficulté d'une telle démarche :

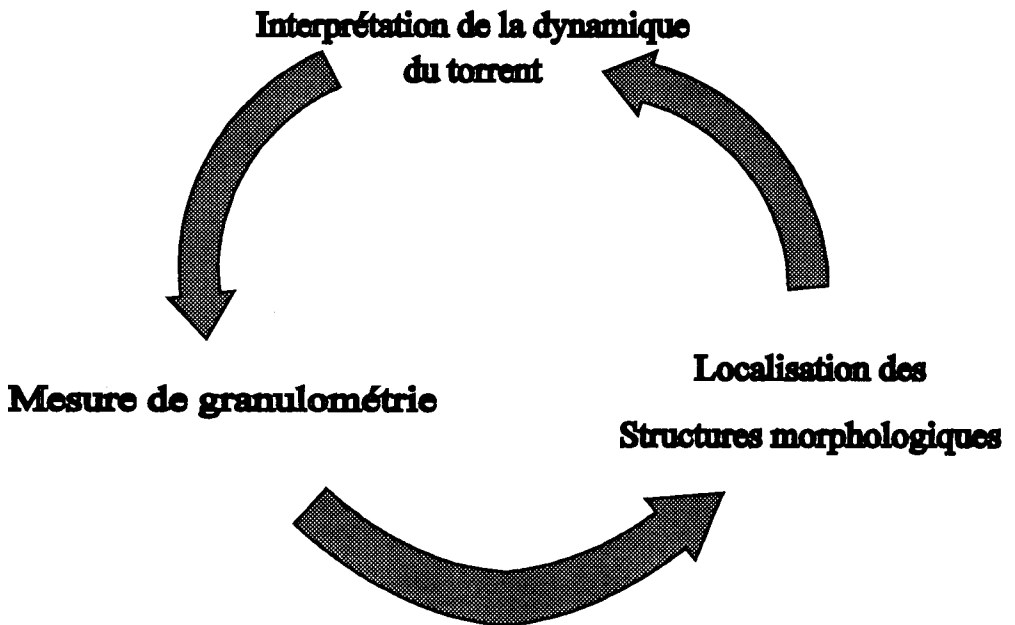


Figure 7-32 : Difficulté de l'approche des phénomènes torrentiels à partir des observations de terrain.

Ainsi, il n'est pas possible d'obtenir une mesure significative sans faire au préalable une interprétation morphologique... qui a son tour modifiera - plus ou moins - l'interprétation initiale.

C'est pour cette raison qu'il est souvent difficile d'être affirmatif à partir des mesures et qu'il faut être très prudent lorsque l'on tente d'établir des règles de fonctionnement.

D'autre part, l'interprétation morphologique est essentiellement basée sur une approche subjective à partir d'un faisceau d'indices. Or, instinctivement, on recherche toujours préférentiellement les indices qui confirment l'hypothèse retenue. Et les connaissances dans ce domaine sont assez sommaires pour laisser une grande liberté d'interprétation⁵¹.

Il arrive donc que l'on puisse développer deux hypothèses de fonctionnement nettement distinctes (avec, par exemple, la présence ou non de laves torrentielles) et que l'on parvienne à les rendre chacune cohérente et crédible. Dans ce cas, la mesure de granulométrie - outre les paramètres quantitatifs qu'elle fournit - peut être un outil puissant pour retenir l'une de ces hypothèses. Il ne s'agit pas d'un instrument absolu car le choix de la zone de mesure est subjectif et dépend... de l'hypothèse faite sur la dynamique du torrent.

Cependant, le croisement des résultats obtenus sur de nombreux torrents a permis de dégager certaines tendances de fonctionnement⁵² pour un lit alluvial sans apport de matériaux :

- Il est nécessaire lors de l'étude de la dynamique d'un torrent de considérer plusieurs échelles afin de comprendre la globalité des phénomènes et de limiter les risques d'erreur d'interprétation. On a donc distingué deux types d'éléments constituant le torrent :
 - ♦ Les **zones morphologiques**^{df} qui correspondent à des tendances de fonctionnement à l'échelle du bassin versant. Elles traduisent les évolutions à long terme du torrent.
 - ♦ Les **structures morphologiques**^{df}, au contraire sont liées au comportement local et constituent les éléments de base du lit torrentiel.
- Le profil en long montre une décroissance régulière de la pente en allant vers l'aval.
- Les zones de dépôt "régulent" le transport solide en resserrant la granulométrie transportée et probablement en réduisant le débit solide, comme on a pu l'observer sur modèle.
- Il semble que la pente n'est un paramètre explicatif qu'en deçà de 8 %. Au-delà, il s'agirait de "phénomènes à forte pente", dépendant plus de la morphologie, de l'alimentation en matériaux ou du débit liquide que d'une pente moyenne qui a perdu toute signification. Dans ce cas, la dispersion des mesures est nettement plus importante.
- Le charriage ordinaire^{df}, conduit à une courbe granulométrique du lit plus étendue qui se rapproche, en coordonnées linéaires, d'une droite lorsque l'écoulement est longtemps vigoureux. Cependant, il correspond à des structures morphologiques très différentes et contrastées. Il n'est donc pas possible d'associer - comme dans le cas du charriage hyperconcentré - le charriage ordinaire avec une morphologie

⁵¹ Il est rare, en effet, qu'une observation démente de façon catégorique une hypothèse et, généralement, on peut toujours trouver une explication (souvent basée sur l'historique des écoulements) pour justifier une particularité.

⁵² Tous les torrents ne suivent pas ces tendances, mais il est généralement possible d'expliquer ces écarts par des particularités locales.

caractéristique, mais seulement de le mettre en évidence par "différence" avec les particularités des autres types de transport solide (laves, charriage hyperconcentré, suspension).

- Le lit mineur se compose de structures très différentes :
 - ♦ des "structures structurantes" sensibles aux caractéristiques globales du torrent et qui assurent la résistance du lit à l'écoulement (seuils par exemple).
 - ♦ des structures de remplissage, correspondant aux faibles écoulements, qui ont un rôle de régulation du débit solide et dont les caractéristiques sont largement indépendantes de celles du lit à leur niveau (mouilles par exemple).
- La granulométrie évolue de pair avec la pente. Cependant, il faut noter des différences sensibles dans l'évolution suivant la morphologie, les éléments structurants étant plus sensibles à la pente que les éléments de remplissage.
- Des phénomènes de micro charriage hyperconcentré ont été observés pour des débits médiocres sur des dépôts d'anciennes crues. Ils présentent les mêmes caractéristiques que sur modèle et développent des dunes à forte pente. D'autre part, des restes de dunes à forte pente de plus grande ampleur correspondant à de fortes crues ont pu être observées sur deux torrents. Il est apparu une bonne cohérence entre les différentes échelles. Il s'agit cependant d'observations trop fragmentaires pour pouvoir tirer des conclusions générales sur le développement de ces structures.
- En croisant les observations de terrain et le suivi de la dynamique sur modèle, il a été possible de dégager des liens entre les différentes structures morphologiques et les caractéristiques du lit. Il ne s'agit cependant que de tendances qui doivent être tempérées par toutes les particularités naturelles. Elles sont résumées dans le tableau de la page suivante.

Enfin, ces différentes tendances doivent permettre de conduire de façon plus sûre et plus objective ce qui constitue la principale difficulté des études de cas : l'interprétation des caractéristiques du lit pour comprendre et prévenir les phénomènes de crues. Il devient possible de confronter les observations de terrain à ces différents éléments, de confirmer ces tendances ou de parvenir à expliquer les différences pour tirer des conclusions plus fiables.

Nom de la structure	Situation	Description morphologique	Caractéristiques granulométriques	Formation	Rôle sur dynamique	Evolution
Seuil	Zones pavées Plutôt dans un coude ou un rapide [♠] Structure transversale.	"Alignement" transversal de blocs ralentissant l'écoulement et formant une rupture de la ligne d'énergie.	Eléments très grossiers. Courbe granulométrique proche d'une droite. Sensible à la situation longitudinale.	Arrêt d'un amas de blocs en fin de crue. Réarrangement des grains au grès des destructions et des glissements locaux.	Stabilité du lit à cours terme. Rupture de la continuité de l'écoulement. Sans influence sur les crues exceptionnelles.	Destruction brutale par affouillement ou par crues exceptionnelles. Consolidation au gré des crues moyennes.
Mouille	Amont immédiat de seuil.	Très faible pente de la ligne d'énergie à l'étiage.	Granulométrie fine, très incomplète, sans lacune ni irrégularité.	Faibles écoulements chargés.	Régulation du transport solide. Forte respiration [♠] .	Respiration à cours terme. Destruction liée à celle du seuil aval.
Dépôt latéral	Zone peu affectée par l'écoulement.	Dépôt de matériaux fins dans une zone protégée.	Indépendante de la situation longitudinale.	Formation très lente.		Destruction ou abandon par divagations.
Matériaux remaniés		Zone totalement déstructurée.	Révélateur de la granulométrie sous jacente (granulométrie transportée ?)	Intervention extérieure ou sapement à sec par la base.		Destruction et reprise par l'écoulement ou formation d'un pavage en fonction de la granulométrie.
Reprise	Zone d'érosion (éventuellement temporaire).	Reconnaissable par l'affouillement sub-vertical des versants.	Dépend de la granulométrie du matériau érodé. Pavage par blocs "intransportables".	Augmentation locale des contraintes hydrauliques. Dépavage.	Fourniture de matériaux.	Subit les évolutions générales de l'écoulement.
Dépôt de laves	Réduction de la pente ou situation à l'abri des écoulements.	Bourrelet frontal grossier devant le corps de la coulée.	Très proche de la zone de fourniture. Peu de tri.	Arrêt brutal d'une lave.		Très difficile à reprendre si pourcentage élevé d'éléments fins.
Micro dune à forte pente	Dépôt de crue passée. Lit large et à proximité de l'écoulement	Absence de lit mineur marqué, "collines" à la surface du lit majeur.	Granulométrie relativement resserrée (quelques mm à quelques cm).	Charriage hyperconcentré durant des écoulements médiocres.	Evacuation des dépôts anciens et transition vers un lit pavé par le charriage	Matériaux ne présentant aucune résistance à l'érosion. Emportés ou submergés par un dépôt ultérieur.
Dune à forte pente	Large zone de dépôt.	Reste de dépôts raides sans matériaux fins et de replats composés de matériaux plus hétérogènes.		Charriage hyperconcentré durant des crues très exceptionnelles.	Augmentation probable de la résistance du lit par formation de rapides constitués de blocs.	Amoindrissement des caractéristiques par reprise partielle durant des écoulements aux débits plus réduits.

7.10. Liste des figures

Figure 7-1 : Rapport entre la pente et la surface du bassin versant dans les zones de mesure des torrents concernés.....	383
Figure 7-2 : Principe de l'ajustement d'une loi à trois paramètres sur une courbe granulométrique du Torrent des Glaciers.....	393
Figure 7-3 : Evolution longitudinale de la pente sur le torrent de la Cerveyrette.....	404
Figure 7-4 : Profil en long de la zone de dépôt du torrent du St Vincent.....	404
Figure 7-5 : Evolution longitudinale de la pente sur le Rabioux de Châteauroux.....	405
Figure 7-6 : Evolution de la granulométrie le long de la zone de dépôt du St Vincent.....	407
Figure 7-7 : Evolution longitudinale du d90 le long de la zone de dépôt du Rabioux de Châteauroux.....	408
Figure 7-8 : Granulométrie suivant différents transects dans la zone de dépôt du Rabioux de Châteauroux.....	409
Figure 7-9 : d30 en fonction de la pente pour l'ensemble des torrents.....	410
Figure 7-10 : Evolution du d50 en fonction de la pente pour l'ensemble des torrents.....	411
Figure 7-11 : Absence d'évolution longitudinale du d90 en fonction de la pente. Torrent de l'Infernet.....	411
Figure 7-12 : Décroissance de l'excédent en fines en fonction de la pente pour l'ensemble des torrents.....	412
Figure 7-13 : Evolution de l'étendue granulométrique en fonction de l'intensité des écoulements formateurs.....	413
Figure 7-14 : Evolution de la dispersion de la granulométrie (d30) en fonction du lavage pour l'ensemble des torrents.....	415
Figure 7-15 : Comparaison de la granulométrie transportée aux granulométries les plus représentatives de la zone de dépôt pour le torrent du St Vincent.....	416
Figure 7-16 : Evolution granulométrique au confluent de la Cerveyrette et d'un torrent à laves.....	417
Figure 7-17 : Comparaison de la granulométrie des matériaux remaniés avec ceux se trouvant à la surface dans la partie amont de la Cerveyrette.....	420
Figure 7-18 : Absence d'écart significatif entre la granulométrie de surface et celle du matériau remanié en aval des gorges de la Cerveyrette.....	421
Figure 7-19 : Comparaison de la couche de surface et des matériaux formant les couches sous jacentes sur la zone de dépôt du St Vincent.....	422
Figure 7-20 : Comparaison des matériaux remaniés avec les matériaux de surface sur le Torrent des Glaciers.....	423

Figure 7-21 : comparaison de l'évolution de l'étendue granulométrique des terrasses avec celle des lits mineurs sur le torrent de la Béoux.	424
Figure 7-22 : Comparaison de courbes granulométriques de seuil et de mouilles sur le Rabioux de Châteauroux.	425
Figure 7-23 : Confrontation des granulométries des seuils et des mouilles sur trois torrents.	427
Figure 7-24 : Caractéristiques granulométriques du torrent de l'Infernet en fonction du mode de transport.	429
Figure 7-25 : Confrontation de la granulométrie du charriage ordinaire et du charriage hyperconcentré sur le torrent de Rabioux (affluent de la Béoux).	433
Figure 7-26 : Reste probable d'une dune à forte pente sur le cône de dépôt du Rabioux.	435
Figure 7-27 : Diamètre des grains pouvant être transportés en suspension au cours d'une crue décennale.	439
Figure 7-28 : Comparaison du d50 et du diamètre moyen dm avec le diamètre critique de début de mouvement pour une crue décennale.	440
Figure 7-29 : Comparaison du d50 au diamètre critique de début de mouvement pour le débit moyen inter-annuel.	441
Figure 7-30 : Comparaison du d90 au diamètre critique de début de mouvement pour une crue décennale.	442
Figure 7-31 : Confrontation des granulométries de surface du lit majeur avec celles des matériaux employés pour le fonctionnement du modèle durant les essais sur le St Vincent.	444
Figure 7-32 : Difficulté de l'approche des phénomènes torrentiels à partir des observations de terrain.	448



- 1 - Introduction - Généralités
- 2 - Analyse bibliographique
- 3 - Méthodes de mesure
- 4 - Effet local d'un écoulement d'eau claire
sur un lit de granulométrie étendue
- 5 - Passage
d'une modélisation monodimensionnelle
à une approche bidimensionnelle
- 6 - Analyse des effets des variations temporelles et de l'apport amont
de matériaux sur une zone de dépôt
- 7 - Analyse de la complexité des lits naturels

8 - Conclusion

Sommaire

8.1. Objectifs.....	457
8.2. Approche d'un lit torrentiel naturel.....	457
8.2.1. Prédominance du transport solide.....	457
8.2.2. Comportement global du torrent.....	457
8.2.3. Morphologie locale.....	458
8.3. Dune à forte pente.....	460
8.3.1. Description physique.....	460
8.3.2. Conditions d'apparition.....	461
8.4. Les phénomènes locaux.....	462
8.4.1. Modélisation sur modèle réduit.....	462
8.4.2. Charriage hyperconcentré.....	463
8.4.3. Charriage ordinaire - Pavage.....	463
8.4.4. Bistabilité granulométrique.....	463
8.5. Influence des divagations.....	465
8.5.1. Hétérogénéité spatiale.....	465
8.5.2. Débit solide.....	465
8.5.3. Tri granulométrique.....	466
8.5.4. Dépavage.....	466
8.6. Méthode d'étude d'un lit torrentiel.....	467
8.6.1. Méthodologie.....	467
8.6.2. Nécessité de définir l'objectif des mesures.....	467
8.6.3. Méthode de mesure de la granulométrie dans le lit des torrents.....	468
8.7. Perspectives.....	469
8.7.1. Nécessité d'élargir les conditions d'expérimentations - Effet de l'apport de matériaux.....	469
8.7.2. Etablissement d'un modèle numérique prédictif.....	470
8.7.3. Etude systématique des dunes à forte pente.....	471
8.7.4. Rationalisation des mesures de terrain.....	471

8.1. Objectifs

Nous allons synthétiser les résultats obtenus tant vis à vis des phénomènes analysés que de leur mode de quantification, sous la forme qui intéresse le praticien de la protection contre les risques torrentiels ; c'est à dire en partant de la complexité naturelle et en l'expliquant à partir des résultats déduits des expériences sur modèles réduits.

8.2. Approche d'un lit torrentiel naturel

8.2.1. Prédominance du transport solide

Les fortes pentes que l'on rencontre en torrent modifient souvent radicalement le comportement de l'écoulement par rapport aux connaissances acquises en rivière. Ce travail a permis de dégager des éléments du comportement général des torrents soumis à un phénomène de charriage.

Les observations sur modèle réduit ou les calculs hydrologiques (chapitre 7) ont montré que la hauteur d'eau dans un torrent est toujours réduite (lorsque le lit n'est pas contraint latéralement), même pour les crues exceptionnelles (elle dépasse rarement le d_{90} , c'est à dire qu'elle est ordinairement inférieure à un mètre). On a vu sur le modèle réduit du *St Vincent* que cet ordre de grandeur n'était qu'exceptionnellement dépassé alors que le débit liquide atteignait $180 \text{ m}^3/\text{s}$!

Par contre on observe, sur modèle, sur le terrain ou encore en considérant les compte-rendus de crues, que le niveau de l'écoulement s'élève couramment de plusieurs mètres au cours d'une crue : cette évolution est le fruit du transport solide, qui est souvent capable de déposer des quantités de matériaux suffisantes pour modifier fondamentalement les caractéristiques géométriques du lit et élever considérablement son niveau. Ainsi, le transport solide et l'évolution morphologique qui lui est associée sont des phénomènes prépondérants des crues torrentielles.

8.2.2. Comportement global du torrent

Les mesures de terrain ont permis de mettre en évidence un certain nombre de tendances. Il s'agit de caractéristiques générales sur le comportement global du torrent mais aussi sur l'influence et la dynamique de chaque structure morphologique. Ces résultats sont résumés ci dessous :

- Le profil en long montre une décroissance régulière de la pente en allant vers l'aval.
- Les zones de dépôt "régulent" le transport solide en resserrant la granulométrie transportée et probablement en réduisant le débit solide, comme on a pu l'observer sur modèle.
- Il semble que la pente n'est un paramètre explicatif du comportement du torrent qu'en deçà de 8 %. Au-delà, il s'agirait de "phénomènes à forte pente", dépendant plus de la morphologie, de l'alimentation en matériaux ou du débit liquide que d'une pente moyenne qui a perdu toute signification.

- Le charriage "ordinaire", conduit à une courbe granulométrique du lit plus étendue que la granulométrie initiale et qui se rapproche, en coordonnées linéaires, d'une droite lorsque l'écoulement est longtemps vigoureux. Il correspond à des structures morphologiques très différentes et contrastées.

8.2.3. Morphologie locale

Outre l'approche de l'ensemble du torrent, les particularités morphologiques locales ont été prises en considération. Cependant, toutes ces approches sont basées sur une ambiguïté : un lit torrentiel est tellement complexe que les mesures granulométriques dépendent d'une lecture morphologique réalisée *a priori*. Dans ce cas, on explique la dynamique du torrent au moyen de l'interprétation que l'on en a déjà réalisée comme le montre la figure suivante :

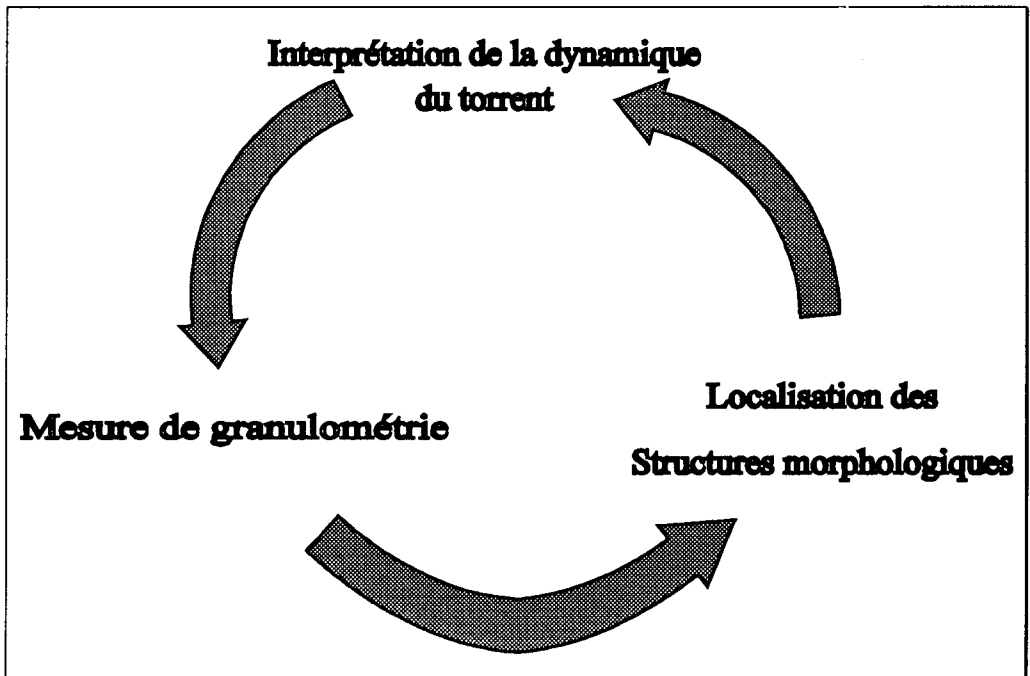


Figure 8-1 : Difficulté de l'approche des lits torrentiels naturels.

Il y a alors des risques de "fausse piste" d'autant plus importants que les connaissances dans ce domaine sont sommaires.

Cependant, en multipliant les observations sur des torrents très différents et en examinant la dynamique des modèles réduits, il a été possible de dégager le rôle, la formation et l'influence de chaque structure morphologique. Les principales tendances sont résumées ci dessous :

- Le lit mineur se compose de structures élémentaires très différentes :
 - ♦ des *éléments structurants* sensibles aux caractéristiques globales du torrent et qui assurent la résistance du lit à l'écoulement (seuils par exemple).

- ♦ des *éléments de remplissage*, correspondant aux faibles écoulements, qui ont un rôle de régulation du débit solide et dont les caractéristiques sont largement indépendantes de celles du lit à leur niveau (mouilles par exemple).
- La granulométrie évolue de pair avec la pente. Cependant, il faut noter des différences sensibles dans l'évolution suivant la morphologie, les éléments structurants étant plus sensibles à la pente que les éléments de remplissage.
- Des restes de dunes à forte pente de grande ampleur correspondant à de fortes crues ont pu être observées sur deux torrents. Il est apparu une bonne cohérence entre les différentes échelles. Il s'agit cependant d'observations trop fragmentaires pour pouvoir tirer des conclusions générales sur le développement de ces structures.
- En croisant les observations de terrain et le suivi de la dynamique sur modèle, il a été possible de dégager des liens entre les différentes structures morphologiques et les caractéristiques du lit. Il ne s'agit cependant que de tendances qui doivent être tempérées par toutes les particularités naturelles.

Il est alors possible, en les confrontant aux observations réalisées sur un torrent particulier, de révéler ses particularités.

Au cours de ces observations, il est apparu que les dunes à forte pente avaient une influence prépondérante sur la morphologie torrentielle. Ces structures, typiques des lits torrentiels, sont abordées dans le paragraphe suivant.

8.3. Dune à forte pente

8.3.1. Description physique

Une dune à forte pente est composée de trois parties :

1. un *chenal central* bien marqué mais de faible pente, ayant un lit presque rectiligne et étroit, qui transporte un fort débit solide, avec des matériaux grossiers semblant rouler ou glisser sur un fond de matériaux plus fins,
2. une *niche amont* en forme d'entonnoir, plus raide, qui collecte les apports amont d'un certain nombre de petits chenaux et peut reculer sous l'effet d'une érosion régressive provoquée par le fort transport du chenal,
3. une *zone de dépôt* s'élargissant à l'aval, qui est, elle aussi, à pente plus raide. Elle progresse naturellement vers l'aval.

Le schéma de fonctionnement en est le suivant :

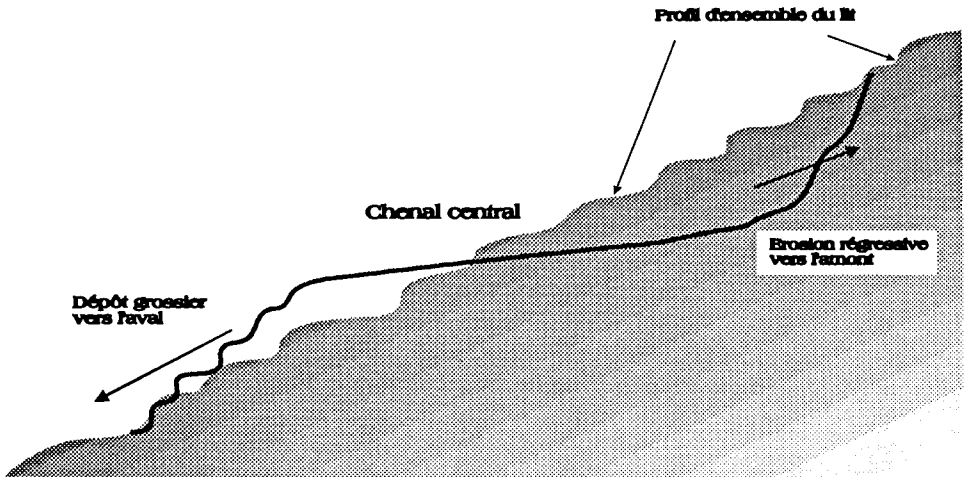


Figure 8-2 : Schéma d'une dune à forte pente.

Une dune à forte pente s'installe lorsque les débits de plusieurs chenaux, en équilibre jusque là, se rassemblent dans un seul chenal, par suite des variations du modelé du lit alluvial, et donnent naissance à un écoulement liquide suffisant pour qu'un débit solide conséquent puisse être transporté. Un lessivage des éléments grossiers se produit alors et un lit fin à très forte capacité de transport s'installe avec érosion régressive et dépôt à l'aval. Ce processus se termine lorsque les conditions d'alimentation évoluent.

Ces dunes à forte pente ont un fonctionnement qui tranche nettement avec l'impression d'équilibre dynamique global que donne un écoulement torrentiel fort ; il y a une accélération locale du processus de transport, de creusement et de dépôt qui fait facilement remarquer ce genre de processus quand il se produit sur le modèle réduit représentant le fonctionnement d'un bief alluvial non contraint. On conçoit qu'il bouleverse en permanence la disposition des chenaux d'écoulement. Mais, comme il y a aussi interaction entre ces différentes dunes à forte pente, elles peuvent très bien

s'amorcer sans se développer longtemps. Il n'est donc pas toujours évident de les reconnaître.

On conçoit que les dunes à forte pente bouleversent sans cesse la morphologie torrentielle, rendent très difficile la quantification de l'hydraulique torrentielle. Dans ces conditions de très forte divagation, en torrent réel comme sur modèle réduit, la notion de hauteur perd sa consistance.

L'observation de ces dunes à forte pente permet de penser que ce phénomène, relativement fugace, permet un déplacement de matériaux nettement plus important que les autres chenaux. Leur variabilité explique donc sans problème celle du transport solide en un point donné.

Dans la nature, on n'a guère la possibilité de constater la formation et l'évolution de ces dunes à forte pente pleinement développées. Par contre, on en voit les restes dans les cas favorables.

8.3.2. Conditions d'apparition

Pour que la dune à forte pente se développe dans un lit alluvial il est nécessaire que de nombreuses conditions soient remplies :

- L'écoulement doit être assez vigoureux pour amorcer - et entretenir le phénomène. En effet, il faut qu'il ait assez de force pour dégager tous les éléments grossiers d'une portion de lit. De telles structures ne se développent qu'avec un transport solide très intense, lorsque le seuil de début de mouvement des matériaux est largement dépassé. Cela correspond généralement à des périodes de retour plusieurs fois décennales.
- La granulométrie étendue - comme l'a indiqué MIZUYAMA (1977) - est indispensable. De plus, il considère que la dune est d'autant plus haute que la dispersion granulométrie est grande.
- L'écoulement doit avoir assez de place pour développer un cône de dépôt à l'aval.
- D'autre part, il semblerait que le déplacement des matériaux par nappes de granulométrie resserrée (comme indiqué par LISLE - 1990) soit indispensable à l'amorçage de ces structures. Cela indique que la zone de divagation doit être assez longue pour qu'un tel transport puisse s'établir.
- Il semblerait que les points "fixant" l'écoulement (berge rocheuse, digue latérale...) facilitent le développement de structures de grandes tailles, en assurant une alimentation en eau assez importante pendant un temps suffisant.

Localement, de tels phénomènes bouleversent totalement le fonctionnement du torrent dans des proportions bien supérieures à celles expliquées par l'hydraulique. Ainsi, l'intérêt de procéder à une série d'essais pour en comprendre le fonctionnement est évident. Il apparaît qu'il s'agit d'un des phénomènes les plus influents sur la morphologie torrentielle avec ceux conduisant à la formation d'un lit pavé.

8.4. Les phénomènes locaux

8.4.1. Modélisation sur modèle réduit

Il est apparu indispensable, dans un premier temps, de réaliser une étude des phénomènes locaux élémentaires liés au charriage torrentiel. On a utilisé dans ce but un modèle réduit de dimensions aussi faibles que possibles. Cette démarche ne peut expliquer que le comportement ponctuel d'un écoulement sur fond mobile.

Cependant, elle permet aussi de modéliser deux phénomènes importants de la dynamique torrentielle :

- le fonctionnement du chenal central qui en est l'élément moteur des dunes à forte pente pendant les crues. Il s'agit en effet d'un phénomène correspondant à un canal étroit de longueur relativement réduite (sous réserve de l'application des conditions hydrauliques *ad hoc*).
- la formation d'un pavage - lors des crues médiocres (fonte des neiges) - qui conditionne la réponse du torrent aux crues ultérieures. On s'est attaché au phénomène principal de cette évolution : le tri granulométrique. Il s'agit d'un phénomène très facilement reproductible localement à cause de la faiblesse des interactions spatiales.

On peut donc admettre que la largeur du chenal d'écoulement est fixe et homogène dans les deux cas. Le premier cas correspond de plus aux nombreux essais de calcul de la capacité maximale de transport pour des chenaux de largeur constante, dont on a parlé précédemment. On en déduit d'ailleurs que le transport solide global sur un lit torrentiel alluvial ne peut qu'être inférieur à celui qui se produit dans le chenal d'une nappe de charriage ; et qu'en conséquence, il est assez logique que les formules le surestiment.

De manière plus large, on a analysé le plus finement possible le fonctionnement de ces deux processus torrentiels, par obtention notamment de variables généralement inconnues : la granulométrie du transport solide. En effet si, en hydraulique fluviale, on assimile encore le plus souvent la granulométrie du transport solide à celle du lit, en hydraulique torrentielle, il y a une assez grande différence entre la granulométrie du matériau transporté pendant la crue et celle du lit torrentiel. Leurs liens sont peu connus.

Dans un premier temps, le problème a été simplifié autant que possible en utilisant une seule granulométrie et un canal aussi petit que possible (mais suffisamment grand pour que les conditions aux limites soient négligeables). On a donc réalisé une série d'essais dans un canal de 10 cm de largeur et de 1 à 2 mètres de longueur (voir chapitre 4).

Ces essais ont montré que le charriage torrentiel regroupait deux phénomènes distincts : le charriage hyperconcentré et le charriage ordinaire.

8.4.2. Charriage hyperconcentré

Dans ce cas, l'équilibre dynamique provient du jeu des variables hydrauliques. (pente, débit liquide, débit solide). Les échanges entre le lit et l'écoulement se font autour de la notion de capacité maximale de transport. Toutes les formules de transport solide testées donnent des résultats satisfaisants.

Le lit est constitué de matériaux plutôt fins et les grains sont d'autant plus mobiles que leur diamètre est important (tant qu'il reste inférieur à la hauteur d'eau). Cependant, le débit solide étant très fort, ce tri est peu marqué.

8.4.3. Charriage ordinaire - Pavage

Lorsque l'écoulement est proche des conditions de début de mouvement des grains l'arrachement des grains et la fourniture de matériaux apparaissent comme prépondérants. Dans ce cas, aucune formule de transport solide ne donne de résultats satisfaisants.

Le tri granulométrique est plus classique que précédemment : les matériaux sont d'autant plus mobiles qu'ils sont fins. Cette évolution correspond à un débit solide faible.

Des tentatives d'explications, basées sur les paramètres globaux du lit (granulométrie, pente, vitesse et hauteur d'eau, etc...) ont montré que les phénomènes sont nettement plus compliqués et qu'il n'y a pas univocité entre les paramètres globaux et le transport solide.

Ce transport solide doit être considéré à partir de nouveaux concepts et non plus comme une extrapolation des formulations existantes. Il est probable qu'il soit nécessaire de prendre en considération le stock de matériaux mobilisables dans le lit.

En effet, il est apparu que lorsque les éléments structurants sont en place, les grains dissimulés derrière les blocs sont mis en mouvement par les fluctuations turbulentes et non par dépassement de la contrainte de cisaillement globale. La quantité de matériaux mobilisables dépend alors du volume disponible derrière les grands éléments mais aussi de son taux de remplissage. Or celui-ci est lié directement à l'historique des écoulements et à la nature des transports solides.

Ainsi, la détermination du débit solide à tous les régimes d'un torrent semble particulièrement difficile.

8.4.4. Bistabilité granulométrique

Les expérimentations sur canal "ponctuel" ont montré que le transport solide évolue vers deux états stables : le charriage hyperconcentré et le charriage ordinaire.

Il est apparu que le passage d'un état à l'autre était nettement irréversible, la diminution de la taille des grains du lit correspondant à un accroissement du transport solide, alors que l'augmentation de blocs dans le lit, conduit à un tarissement rapide de la fourniture en matériaux.

Un modèle numérique, décrivant l'évolution locale du lit et du transport solide dans un lit torrentiel, basé sur ces résultats a été construit. Pour ce faire, il faut séparer le problème en deux :

- **Le calcul du débit solide global.** Il s'agit d'un problème ardu qui nécessiterait probablement de prendre en compte le volume de matériaux mobilisables dans le lit. Pour ce modèle, on a utilisé les valeurs mesurées durant les essais.
- **La détermination du tri granulométrique.** Cette modélisation a été réalisée à partir de l'indice de mobilité relative¹ mesuré lors des essais en canal de 10 cm de large. Elle montre, le caractère très instable à la fin de la phase de très fort transport solide. En effet, le modèle converge très rapidement et de façon totalement irréversible, soit vers un lit pavé soit vers un lit très lisse correspondant au charriage hyperconcentré. La sensibilité aux conditions initiales est très importante.

Les résultats concernant ce modèle sommaire se trouvent à l'annexe IV.

¹ Il s'agit d'un paramètre qui traduit la mobilité des grains d'une classe granulométrique par rapport à celle de l'ensemble des matériaux.

8.5. Influence des divagations

En torrent, il y a généralement une possibilité de divagation pour l'écoulement. On a donc abordé ici les modifications de l'hydraulique torrentielle engendrées par cette possibilité supplémentaire (chapitre 5 & 6). Cette démarche facilite la correspondance entre observations sur modèle et sur le terrain.

8.5.1. Hétérogénéité spatiale

Dans une seconde étape, le champ d'expérimentation a été étendu en offrant à l'écoulement la possibilité de divaguer et d'ajuster la largeur du lit aux conditions hydrauliques et de transport solide.

Ainsi, l'utilisation d'un modèle physique de plus grande taille (chapitre 6) a montré un comportement très cohérent avec la bistabilité granulométrique mise en évidence par les mesures ponctuelles. Il se traduit par une forte hétérogénéité spatiale : suivant les conditions locales, le torrent bascule ponctuellement dans un de ces deux états stables.

On observe ainsi, un transport exacerbé sur un lit lisse en certains points et un lit peu mobile formé d'éléments plutôt grossiers en d'autres sites. Il s'agit là des deux phénomènes conduisant aux dunes à forte pente. Ces fortes différences de débit solide se traduisent par une morphologie changeante (dépôt ou érosion localement importants) et des variations locales assez importantes des débits liquide et solide suffisants pour permettre un changement d'état en un point².

Ainsi, même pour des crues exceptionnelles, le charriage hyperconcentré ne se produit jamais seul sur l'ensemble du lit mais est toujours accompagné, en certains points, d'un charriage ordinaire.

8.5.2. Débit solide

La plupart des équations concernant les pertes de charge ou le transport solide torrentiels ont été établies à partir de mesures sur modèle monodimensionnel. Les résultats obtenus sont basés sur la confrontation des essais sur canal étroit (chapitre 4) et ceux réalisés sur canal de 60 cm (chapitre 5).

Une fois de plus il faut distinguer deux phénomènes distincts :

- **loin du seuil de début de transport**, le débit solide est, à pente et à débit liquide équivalent, environ 1.7 fois plus faible dans le cas d'un canal permettant des divagations.

En fait, la morphologie d'un lit soumis à un charriage hyperconcentré illustre - en partie - cette différence lorsque se développe une dune à forte pente : la partie centrale (similaire aux canaux à largeur réduite) est formée d'un chenal rectiligne dans lequel le transport solide est nettement supérieur au reste du lit malgré une pente réduite.

² Par exemple, la concentration temporaire de tout l'écoulement en un point conduit, même si celui-ci était constitué d'éléments grossiers, à un affinement du lit et une brusque augmentation du débit solide local.

Ainsi, on comprend que l'ensemble du lit ne permette qu'un débit solide inférieur à celui de cette partie centrale dans laquelle le débit est si fort qu'il crée une érosion en amont, un dépôt en aval et un basculement de pente.

- **Lorsque l'écoulement est moins vigoureux**, l'écart diminue, et le lit pavé se comporte de la même façon, que la largeur soit libre ou non : la largeur du lit mineur est alors fixée et l'écoulement ne peut divaguer à faible débit même si le canal est large. Il n'est donc pas apparu d'écart significatif entre les 2^o et 3^o phases des essais sur le canal de 10 cm et sur le canal de 60 cm de large.

Ainsi, la différence entre canal monodimensionnel et bi dimensionnel n'est notable que pour de forts débits, c'est à dire dans la zone de validité des formules. Dans ce cas, il apparaît que le débit solide calculé doit être divisé par 1.7 pour tenir compte des phénomènes liés aux divagations.

8.5.3. Tri granulométrique

Il est apparu que la granulométrie transportée est plus resserrée à la sortie d'un canal large, les différentes structures morphologiques permettant de stocker soit des éléments fins soit des éléments grossiers. C'est par exemple le cas des marches d'escalier : les seuils sont composés d'éléments plutôt grossiers alors que les mouilles stockent les éléments fins. Les dunes à forte pente permettent aussi une telle ségrégation à une plus grande échelle.

Ainsi, les zones de divagations apparaissent comme des régulateurs du transport solide et conduisent à un resserrement de la granulométrie transportée.

Ce phénomène a été mesuré à la fois sur modèle réduit et sur le terrain (paragraphe 7.5.1).

8.5.4. Dépavage

La confrontation des essais en canal de 10 cm avec ceux réalisés sur un canal de 60 cm montre une très nette différence de comportement lors de la destruction du pavage.

En effet, dans le cas d'un écoulement monodimensionnel, le dépavage se produit par arrachement des grains du lit et enfoncement : c'est donc bien une remise en mouvement de la structure qui avait été construite lors du pavage.

Au contraire, lorsque le débit augmente dans un lit majeur large, il commence à s'écouler dans le lit principal. Ensuite, l'écoulement s'étend aux lits secondaires, moins pavés car ne recevant pas d'écoulement pendant la phase de formation du pavage : ce sont eux qui vont commencer à fournir des matériaux. **Ainsi, lorsqu'il y en a la possibilité, la fourniture de matériaux se produit préférentiellement par divagation plutôt que par érosion verticale.**

Comme en canal étroit, le débit de dépavage est supérieur à celui appliqué lors du pavage. Cependant, dans les deux cas, le dépavage est progressif, et il n'a pas été possible de définir de critère de dépavage absolu... ni de débit de dépavage. Il est donc difficile de quantifier cet écart. Il semble préférable de retenir que, **lorsque ce paramètre à sens**, le début de dépavage se produit pour le débit de plein bord.

8.6. Méthode d'étude d'un lit torrentiel

Il s'agit de regrouper dans ce paragraphe les principaux résultats obtenus sur modèle réduit et issus des observations de terrain et qui peuvent être utiles pour mener à bien une étude de cas.

8.6.1. Méthodologie

Les mesures de terrain ont montré combien il est important de prendre d'abord en compte la globalité d'un torrent. Il faut, en effet, déterminer les différentes zones morphologiques et leur capacité à fournir des matériaux. Il est alors possible de situer le débit solide réel par rapport à la capacité maximale de transport et de savoir dans quel sens évolue le lit en cas de crue.

On peut ensuite pressentir la formation de structures morphologiques particulières telles que les dunes à forte pente. Enfin, il est important de déterminer si les zones de dépôt ou de transit sont assez vastes pour pouvoir réguler le transport solide (en quantité et en granulométrie) comme les observations l'ont montré. Cette régulation est importante car elle est susceptible de faciliter le transit dans les biefs aval.

Une fois ces tendances dégagées, on peut calculer le volume déposé ou arraché en utilisant des formules de transport solide. Cependant, il est nécessaire d'adapter les résultats des calculs à cause des différences entre charriage ordinaire et charriage hyperconcentré.

D'autre part, la réalisation des mesures dans le cadre d'un lit de torrent nécessite une méthodologie spécifique qu'il a fallu développer. C'est l'objet du paragraphe suivant.

8.6.2. Nécessité de définir l'objectif des mesures

Un lit torrentiel est le résultat d'une succession d'épisodes de la vie d'un torrent. En effet, il cumule les traces de très fortes crues passées (temps de retour plusieurs fois décennal) dans le lit majeur, et les restes des derniers écoulements "un peu forts" (temps de retour de l'ordre de quelques mois) à proximité de l'écoulement.

Les caractéristiques de ces vestiges sont évidemment aussi hétérogènes que les phénomènes qui les ont engendrés. Chaque structure correspond à un aspect particulier du torrent.

Il peut donc y avoir, en un même point, plusieurs granulométries différentes, représentatives chacune d'un phénomène particulier. L'objectif de ce travail était d'associer une zone de mesure aux besoins qui peuvent être rencontrés dans une étude.

La première démarche, lorsque l'on cherche à déterminer une granulométrie est de se demander quel phénomène va être étudié, et donc quel type de granulométrie doit être mesuré. Ne pas faire cette démarche conduit inévitablement à des contre sens et des interprétations erronées.

8.6.3. Méthode de mesure de la granulométrie dans le lit des torrents

La méthode de référence, concernant la mesure de granulométrie est celle des tamis. Cependant, elle est très mal adaptée à une utilisation en torrent. Très tôt, WOLMAN (1954) a proposé une méthode basée sur un échantillonnage linéique qui fournit des résultats équivalents. La démarche est la suivante :

1. On dispose sur le sol un élément de référence (chaîne d'arpenteur, décamètre, etc...).
2. On prélève tous les cailloux qui se trouvent sous les graduations correspondant à un pas d'espace prédéfini,
3. On mesure le diamètre intermédiaire³ du caillou (le mètre s'impose par son bon compromis facilité d'emploi - précision),
4. La fréquence est une fréquence en nombre, **un élément étant compté autant de fois qu'il apparaît sous les graduations.**

Cette démarche est bien adaptée au cas des torrents car elle nécessite un appareillage très simple et permet de traiter des éléments de grande taille. **La seule condition importante est d'effectuer un prélèvement réellement aléatoire et d'éviter tout choix subjectif.**

Après l'étude des différentes incertitudes liées à la mesure d'une granulométrie (chapitre 3), il est apparu qu'il est possible d'effectuer la classification suivante par ordre décroissant d'importance des sources d'erreur :

- **le choix de l'échantillon.** Les variations sont alors très importantes mais il n'y a pas de moyen pour limiter ce phénomène dépendant du choix de la zone de mesure, hormis de multiplier les mesures afin de couvrir de nombreuses zones. Cet aspect est directement lié à la finesse de la lecture morphologique.
- **La taille de l'échantillon.** On a vu que, pour optimiser le temps consacré à la détermination de la granulométrie, il est souhaitable de prendre en considération un échantillon d'une centaine d'éléments.
- **L'erreur de mesure du diamètre** qui n'a d'influence que lorsqu'elle introduit un biais systématique.

Ainsi, il est possible, en prenant des précautions, d'obtenir des mesures significatives. En effet, si les gradients granulométriques sont importants au sein d'une zone "homogène", les variations sont beaucoup plus importantes d'une zone morphologique à une autre mais aussi d'une zone du torrent à une autre. Les erreurs de mesure de ces paramètres deviennent alors faibles par rapport à leurs variations naturelles. Ces écarts ont été traités au chapitre 7 consacré à l'interprétation des mesures de terrain.

³ On distingue 3 diamètres caractéristiques pour un grain qui correspondent chacun à son épaisseur suivant trois directions orthogonales.

8.7. Perspectives

On a regroupé ici les possibilités d'études prometteuses dans la continuité de ce travail. En effet, la connaissance des phénomènes torrentiels est si sommaire qu'un très grand nombre de pistes de recherches se présentent. Mais, les phénomènes sont tellement complexes et imbriqués qu'une recherche entreprise sans objectifs précis aboutit difficilement à des résultats.

Ainsi, seules quelques possibilités d'études sont présentées ici.

8.7.1. Nécessité d'élargir les conditions d'expérimentations - Effet de l'apport de matériaux

L'influence de l'apport de matériaux en amont est mal connue et engendre des caractéristiques souvent contradictoires. Par exemple, les expériences conduites par SCHILLER & ROWNEY (1984) pour des pentes inférieures à 1% montrent que le pavage est plus grossier avec alimentation amont que sans, mais que la taille des grains de la surface du lit diminue avec l'augmentation de celle des matériaux injectés.

De plus, il est admis chez bon nombre de praticiens que le transport de matériaux fins conduit à une augmentation du transport solide et à un renforcement du pavage (voir paragraphe 2.7.9).

Or, cette question est essentielle dans le cas d'aménagement conduisant à installer un dessableur sur un torrent (par exemple dans le cadre d'une prise d'eau). En effet, il faut savoir si le rejet des éléments fins est bénéfique ou si - au contraire - il prépare la déstabilisation du lit⁴.

Au cours de ces essais, il est apparu qu'un fort transport solide était lié à la présence d'une fraction importante d'éléments fins dans le lit. Cependant, il semble indispensable de réaliser des essais spécifiques pour répondre de manière sûre à cette question et d'établir des liens de cause à effet.

Le phénomène de tri correspond à l'interaction entre les matériaux du lit et ceux du transport solide. Il s'agit, *a priori*, de deux entités indépendantes. Il s'offre alors un champ d'expérimentations extrêmement large, puisque l'on peut combiner des matériaux de caractéristiques différentes et faire varier les débits liquide et solide mais aussi la pente. Enfin, le tri étant forcément un phénomène transitoire, le protocole employé intervient sur les vitesses de variations des différents paramètres.

Malheureusement, une étude ne peut considérer qu'une très faible partie des conditions expérimentales possibles. C'est le cas ici où plusieurs hypothèses fortes ont été retenues, ce travail étant destiné à clarifier les différents phénomènes intervenant :

- Granulométrie du lit et des matériaux injectés durant la phase de fort transport solide identiques,

⁴ La même question apparaît dans le cadre d'aménagement de domaines skiabiles : les travaux entraînent une nette augmentation de la fourniture de matériaux fins (sables et graviers) au torrent. Ce phénomène favorise-t-il notablement la déstabilisation du lit? Dans ce cas, il semble que l'installation d'un dessableur retenant une partie de ces éléments soit une mesure préventive intéressante.

- Utilisation de la même granulométrie pour tous les essais,
- Absence totale de transport solide en amont du canal dans la phase de formation du pavage,
- Débit liquide de formation de pavage constant,
- Pente initiale de 12 % pour tous les essais,
- Pente variable durant les essais en fonction de l'érosion produite...

Ainsi, malgré la variation des débits nominaux des essais (de 0.2 à 0.3 l/s), ces essais sont très semblables et ne correspondent qu'à une très faible étendue des phénomènes de pavage en torrent.

Il semble indispensable, pour obtenir des résultats généralisables, de faire varier les paramètres suivants :

- **Pente du canal.** Il s'agit du principal paramètre des phénomènes torrentiels (en particulier pour les pentes comprises entre 2 et 10 %). Il est nécessaire de savoir dans quelle mesure ce paramètre influence le phénomène de pavage et la morphologie finale d'un lit.
- **Granulométrie des matériaux.** Il n'est apparu aucune rupture de comportement entre les classes granulométriques. Cependant, il est plausible que des particularités de la granulométrie des matériaux employés dans ces essais influencent les résultats. Il est donc nécessaire de dégager, en utilisant d'autres granulométries, l'ensemble des paramètres pertinents décrivant le comportement d'un matériau de granulométrie étendue.
- **Apport de matériaux durant le pavage.** C'est le point qui présente le plus d'inconnus. En effet, durant ces essais les matériaux transportés étaient ceux arrachés au lit. Il ne peut y avoir indépendance entre les grains de l'écoulement et ceux du lit. Ainsi, les calculs de mobilité relative ne sont valables que dans le cas d'une pénurie en matériau. La généralisation de ces résultats nécessite une indépendance entre les deux granulométries employées. C'est évidemment un travail expérimental beaucoup plus complet qui doit alors être réalisé.

8.7.2. Etablissement d'un modèle numérique prédictif

Un modèle particulièrement sommaire (voir annexe IV) a été construit pour simuler le tri granulométrique observé pendant ces essais sur canal "ponctuel" (chapitre 4).

Il semble possible de construire un modèle complet des phénomènes ponctuels, en élargissant la démarche déjà employée. Il reste encore à prendre en compte les éléments suivants :

1. Détermination du débit solide.
2. Prise en compte des interactions conditions hydrauliques \Leftrightarrow lit torrentiel.
3. Influence du transport solide provenant de l'amont (débit solide mais surtout granulométrie transportée).

Il s'agit d'un objectif à long terme, mais c'est sans doute un moyen puissant de comprendre, puis éventuellement de prévoir, le comportement d'un torrent, en élargissant le calcul ponctuel à toute une zone au moyen d'un maillage.

Cependant, il est encore nécessaire, avant de construire le modèle numérique, de se doter des équations de base de ces phénomènes en complétant les mesures sur canal "ponctuel".

8.7.3. Etude systématique des dunes à forte pente

On a vu que les dunes à forte pente étaient susceptibles de modifier localement les conditions d'écoulement et le niveau du lit dans des proportions considérables.

Cependant, les paramètres explicatifs de la formation de ces structures, de leurs caractéristiques géométriques, et surtout le rôle d'ouvrages (seuil, digues...) n'ont pas été étudiés de façon systématique. Or, il semble qu'il est nettement préférable d'empêcher le développement de ces structures en amont d'ouvrages de protection ou de franchissement.

L'intérêt de procéder à une série d'essais sur ce thème est évident. Par contre, ils présentent de réelles difficultés pratiques :

- Il faut reproduire de fortes crues (donc déplacer et traiter un volume de matériau important) sur un modèle de grande taille.
- la dune à forte pente est particulièrement difficile à observer - et à quantifier - car elle est fugace et présente une hauteur faible par rapport à sa surface.

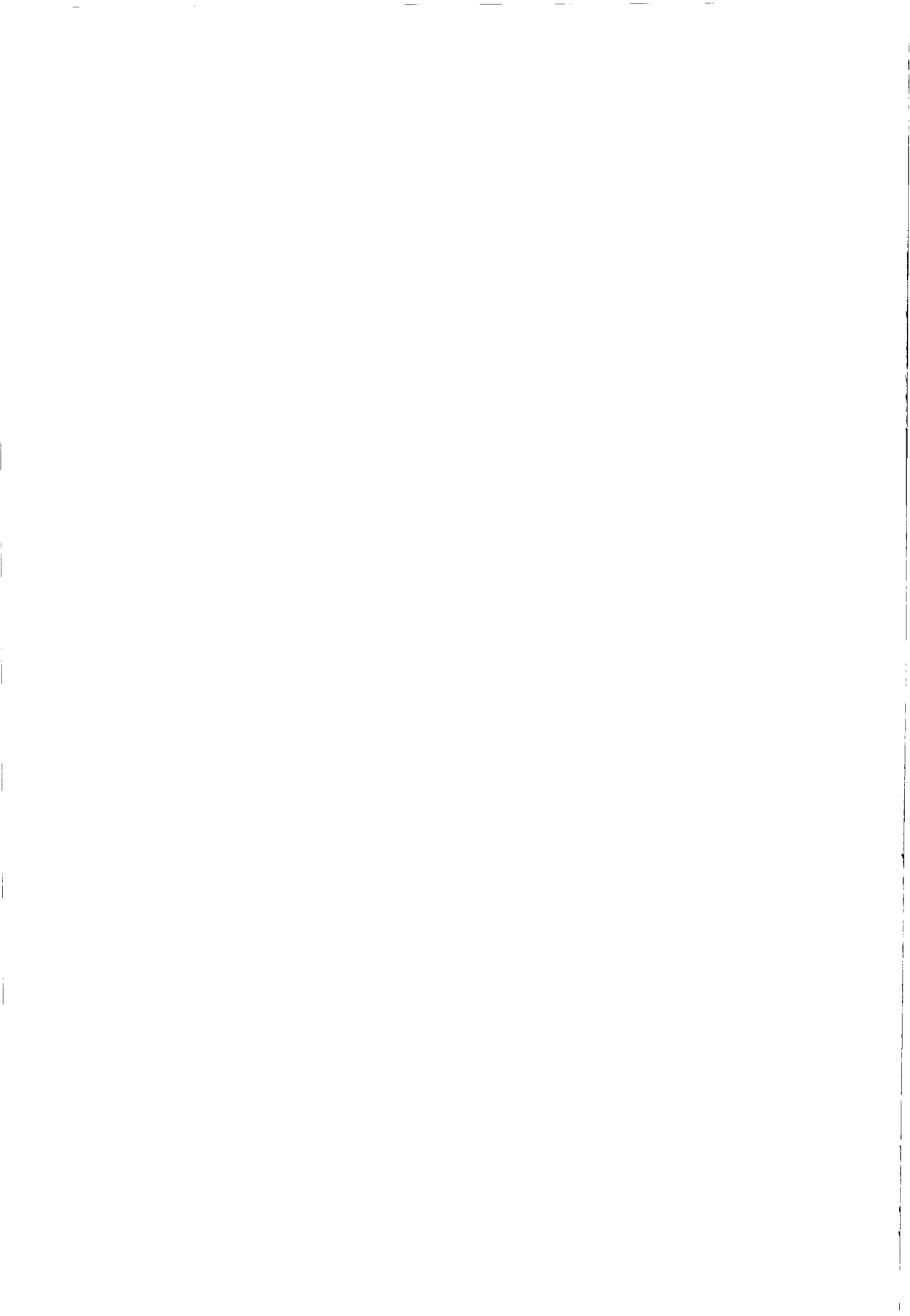
8.7.4. Rationalisation des mesures de terrain

Il est donc nécessaire d'introduire des règles de fonctionnement plus rigides, basées sur une plus large observation de lits torrentiels, une confrontation plus étendue d'avis différents, et le recours au modèle réduit pour vérifier certaines hypothèses.

Muni de "gardes fou", le praticien pourra alors réaliser une interprétation plus facile et plus objective.

Enfin, la détermination systématique des paramètres caractéristiques reste un objectif de premier ordre.

Finalement, il a été possible de mettre en évidence une logique d'ensemble du charriage torrentiel et des imbrications d'échelles (de temps et d'espace). Il semble donc possible de mettre en oeuvre des travaux de recherche sur des aspects plus ponctuels de ces phénomènes sans perdre de vue la dynamique d'ensemble des processus et d'aboutir à des résultats plus quantitatifs.



Bibliographie

ACKERS P. & CHARLTON F.G. (1970)

Meander geometry arising from varying flows
Journal of Hydrology, 11

ADAMS J. (1979)

Gravel Size Analysis From Photographs
Journal of the Hydraulics Division - Vol. 105 - n°10

ALBERT M.-B. (1992)

Equilibre morphologique et débit de plein bord
Société Hydrotechnique de France - 22° journée de l'Hydraulique - Paris

ALLEN (1978)

Computational methods for dune time-lag : calculation using STEIN'S rule for dune height
Sedimentary Geology, 20, U.S.A.

ALTSHUL A.A. (1982)

Résistances hydrauliques
Ed. Nedra - Moscou

ANDREWS E.D. (1983)

Entrainment of gravel from naturally sorted riverbed material
Geol. Soc. Am. Bull. n°94

ANDREWS E.D. (1984)

Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado
Geol. soc. Am. Bull. n°95

ANDREWS E.D. & SMITH J.D. (1992)

A theoretical model for calculating marginal bedload transport rates of gravel
Dynamics of gravel bed rivers. Edited by Billi, Hey, Thorne & Tacconi

ASHIDA K., EGAHIRA S. & ANDO (1984)

Generation and Geometric Features of step-pool, bed forms
Disaster Prevention Research Institut - Kyoto Univ. N°27B-2

ASHIDA K. & BAYAZIT (1973)

Initiation of motion and roughness of flow in steep channels
Proc. Of the IAHR 15th congress - Istanbul

ASHIDA K. & MICHIE M. (1972)

A fundamental study of resistance of a flow on a movable bed and bed load transport rate
JSCE, Professional paper 206, Oct. 1972

ASHIDA K., TAKAHASHI T., MIZUYAMA T. (1977)

Study of the initiation of motion of sand mixtures in a steep slope channel
Suin-Sabo, Vol. 29, n°4

ASHMORE P. (1987)

Bed load transfer and channel morphology in braided streams
Erosion and sédiment in the Pacific Rim - IAHS Publication N° 165
Corvallis aout 1987

AZIMI P.D. & DESVARREUX P. (1988)

Etude des risques d'érosion aux Conques de Vernet (Massif du Canigou).
Service RTM des Pyrénées Orientales - Association pour le Développement des
Recherches sur les Glissements de Terrain.

BAGNOLD R.A. (1955)

Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in Newtonian fluid under shear
Royal Society London - A 225

BATHURST J.C. (1978)

Flow résistance of large-scale roughness
J. Hydraul. Div. A.S.C.E. 104 (12)

BATHURST J.C. (1982)

Theoretical aspect of flow resistance
Gravel-Bed Rivers Ed. by C.R. THORNE, J.C. BATHURST & R.D. HEY

BATHURST J.C. (1985)

Flow resistance estimation in mountain rivers
Journal of the hydraulics division

BATHURST J.C. (1987)

Critical conditions for bed material movement in steep mountain streams
Erosion and sédiment in the Pacific Rim - IAHS Publication N°165
Corvallis aout 1987

BATHURST J.C., GRAF W.H. & CAO H.H. (1982)

Initiation of sediment transport in steep channels with coarse bed material
Euromech 156: Mechanics of sediment transport - Istanbul

BATHURST J.C., GRAF W.H. & CAO H.H. (1985)

Bed load discharge equations for steep mountains rivers
International workshop on problems of sediment transport in gravel bed rivers
Pingree park - Colorado - USA

BERNARD (1925)

Cours de restauration des Montagnes
Ecole Nationale des Eaux et Forêt de Nancy

BESNARD A. (1993)

Etude de l'impact des aménagements dans la vallée de la Guisane (05)
Mémoire de 3° année - Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de
Strasbourg - Service Départemental de Restauration des Terrains en Montagnes des
Hautes-Alpes.

BORGES A.L. DE O. (1993)

Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du Sud
Thèse de l'université Joseph Fourier - Grenoble I - CEMAGREF

BORAH D.H., ALONSO C.V., PRASAD S.N. (1982)

Routing graded sediment in streams. Applications
Journal of hydraulic division, ASCE, Vol. 108, n° HY12

BOUVARD M. (1981)

Entrainement des matériaux
Cours ENSHMG - INPG

BUNTE K. (1990)

Experiences and results from using a big-frame bed load sampler for coarse
matériaux bed load
Hydrology in mountainous region I - IAHS Publ. n° 193 - 1990

CAO H.H. (1985)

Résistance hydraulique d'un lit de gravier mobile à pente raide - Etude expérimentale

Thèse n°589 - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

CARION C. (1986)

Pertes de charge et granulométrie en torrent

CEMAGREF - ENITRTS (Mémoire de 3^e année)

CARLSTON C.W. (1965)

The relation of free meander geometry to stream discharge and its geomorphic implications

American Journal of Science, 263

CARRET J.-P. (1979)

L'infiltration dans les cônes de déjection de la vallée de la Basse Tarentaise

Thèse Université Scientifique et Médicale de Grenoble

CHENG E.D.H. & CLYDE (1972)

Instantaneous hydrodynamic lift and drag forces on large roughness elements in turbulent open channel flow, sedimentation

ed. by H.W. Shen

COSTER & CHERMANT (1985)

Précis d'analyses d'images

Editions du CNRS

DELOYE F.X. (1987)

Réflexion sur la granulométrie photographique

Bull. liaison Labo Pont et Chaussées 152 - Nov. Dec. 1987

DISPLAS P. (1986)

Bed load transport in gravel - bed streams: some properties

Proceedings 3rd International symposium on river sedimentation - Jackson - Mississippi

DURY G.H. (1973)

Magnitude-frequency analysis and channel morphology

Fluvial Geomorphology, SUNY Binghamton

EGASHIRA S. & ASHIDA K. (1989)

Flow resistance and sediment transportation in streams with step-pool bed Morphology

International Workshop on fluvial hydraulics of montains regions - TRENT, ITALIE

EGIAZAROFF I.V. (1965)

Calculation of nonuniform sediment concentrations

Proc. ASCE, Vol. 91, HY4

EINSTEIN H.A. & ELSAMNI S.A. (1949)

Hydrodynamic forces on a rough wall

Review of modern physics 21, 1949

ENGELUND F. & HANSEN E. (1967)

A monograph on sediment transport in alluvial streams

Teknisk Forlag - Copenhagen

ERGENZINGER P. & SCHMIDT K-H. (1990)

Stochastic elements of bead load transport in a step-pool mountain river

Hydrology in mountainous region I - IAHS Publ. n° 193

GARDE R.J. & RAJU R. (1963)

Regime criteria for alluvial stream

Proc. ASCE. vol. 89, HY6, pp. 77-100

GESSLER (1965)

Beginning of deadload movement of mixtures investigated as natural armoring in channels

Repport n°69 - Laboratory of hydraulic research and soil mechanics of Swiss federal institute of technology - Zurich

GRAF W.H. (1989)

Flow resistance over a gravel bed; its consequence on initial sediment movement

International Workshop on fluvial hydraulics of montains regions - TRENT, ITALIE

GRAF W.H. & SUSZKA (1985)

Unsteady flow and its effect on sediment transport

IAHR Congress, Melbourne 19-23 august 1985

GRAF W.H. & SUSZKA (1987)

Sediment transport in steep channels
Proc. Jap. Soc. Civ. Engg. - J. Hydrosoc. and Hydr. Engg. - Vol. 5 n°1

GRIFFITHS G.A. (1981)

Flow resistance in coarse gravel bed rivers
Journal of the Hydraulics Division - Proc. of the ASCE - Vol. 107, n° HY7

HAMPEL R. (1977)

Geschiebewirtschaft in Wildbächen
Wildbach und Lawinenverbau - Mai 1977

HAMPEL R. (1977)

Geschiebewirtschaft in Wildbächen - Zweiter Teil
Wildbach und Lawinenverbau - September 1977

HARVEY A.M. (1969)

Channel capacity and the adjustment of streams to hydrologic regime
Journal of Hydrology, 8

HERBICH J.B. & SHULITS S. (1964)

Large scale roughness in open channel flow
Journal of the Hydraulics Division, ASCE - Vol 90, n°HY6

HEY R.D. (1975)

Design discharges for natural channels
Science and Technology in Environmental Management - Farnborough

HEY R.D. (1978)

Determinate hydraulic geometry of rivers channels
Journal of the hydraulics division, Proc of the ASCE, Vol. 104, n°HY6

HEY R.D. (1979)

Flow resistance in gravel bed rivers
Journal of the hydraulics division, Proc of the ASCE, Vol. 105, n°HY4

HEY & THORNE (1983)

Accuracy of surface samples from gravel bed material
ASCE Journal of Hydraulic Engineering - Vol. 109 - n°6.

IKEDA S. & IZUMI N. (1990)

Whith and depth of self-formed straight gravel rivers with bank vegetation

Water resources research - Vol. 26, N°10 - October 1990

IKEDA H. & ISEYA F. (1988)

Experimental study of heterogeneous sediment transport

Environmental recseach center papers - University of Tsukuba - n°12

INPHEEIIWH (1980)

(Institut National Polytechnique d'Hydraulique, d'Electricité, d'Electronique et d'Informatique de Wuhan)

Dyanmique de transport solide

Cours d'ingénieur - Vol. I et Vol. II

IWAGAKI Y. (1954)

On the laws of turbulent flows in open rough chennals

Proc. of the 4th Japan National Congress for applied mechanics

IWAGAKI Y. (1955)

A fundamental study on ground erosion mechanism due to Rainwater

Doctor thesis

JAMES C.S., LYMBEROPOULOS G. & SCALLA P. (1990)

An expérimental study of the effect of bed grain roughness on sediment sorting by entrainment

Water S.A. - Vol. 16 - n°4 october1990.

KARIM M.F. (1981)

Computer-based predictors for sediment discharge and friction fractor of alluvial streams

Thesis prepared to Iowa Univ. USA

KARIM M.F. & KENNEDY J.P. (1982)

IALLUVIAL: a computer based flow and sediment routing model for alluvial streams and its application to the Missouri river

IIHR report n°250. University of Iowa. USA.

KARIM M.F. & KENNEDY J.F (1986)

Degradation of gravel-material beds in sediment-deficient rivers

International Journal of Sediment Research, n°1 Vol. 1

KELLER E.A. (1978)

Areal sorting of bed load materiel: the hypothesis of velocity reversal
Geological society america bulletin - Vol. 89

KELLERHALS R. & BRAY D.I. (1971)

Sampling procedures for coarse fluvial sediments
Journal of the Hydraulics Division. ASCE - Vol. 97, n°8

KENNEDY J.F. (1963)

The mechanics of dunes and antidunes in erodibles bed channels
Journal of fluid mechanics Vol. 16 - n°4

KEULEGAN G.H. (1938)

Laws of turbulent flow in open cannals
J. Res. Nat. Bur. Stand. - U.S. Dept. Of Commerce, Vol 21

KRESSER W. (1964)

Oesterreichische Wasserwirtschaft, Vol. 16 - n° 1/2

KILPATRICK F.A. & BARNES H.H. (1964)

Channel geometry of piedmont streams as related to frequency of floods
United States Geological Survey, 422E

KRAGE J.U., OUAHID A., WARWRZYNIAK P. (1992)

Etude de l'aménagement d'une plage de dépôt sur le cône de déjection du torrent du St Vincent (PYRENEES - ORIENTALES)
Projet de fin d'étude - Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de mécanique de Grenoble.

KUHNLE R.A. & SOUTHARD J.B. (1988)

Bed load transport fluctuations in a gravel bed laboratory channel
Water resources research - Vol. 24, n°2

LAIGLE D. (1992)

Etude du torrent du Bresson - Le Touvet - Saint Vincent de Mercuze (38)
CEMAGREF, Groupement de Grenoble, Division contre les Erosions - Service RTM de l'Isère.

LAMBERTI A. & PARIS E. (1989)

Experimental analysis of armouring process
International Workshop on fluvial hydraulics of montains regions - TRENT, ITALIE

LANE E.W. (1955)

The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering
Proceedings of American society of civil Engineers - Vol. 21, n°745

LARRAS J. (1972)

Hydraulique et granulats
Collection du centre de recherche et d'essai de Chatou - Eyrolles - Paris

LARSEN (1990)

Sediment by-pass structure for high sediment loads
Hydrology in mountainous region II - IAHS Publ. n° 193 - 1990

LEFEBVRE B. (1979)

*Etude hydraulique de la protection de la R.N.6 (route de Fréjus - Lyon -
Turin) au confluent de l'Arc et du torrent du Pousset*
SOGREAH - DDE Savoie

LEFORT PH. - SOGREAH (1991)

Transport solide dans le lit des cours d'eau. Dynamique fluviale.
ENSHMG - INPG

LEOPOLD L.B. & LANGEIN W.B. (1962)

The concept of entropy in landscape evolution
U.S. Geological Survey Professional Paper 500-A

LEOPOLD L.B. & MADDOCK JR. (1953)

*The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic
implications*
U.S. Geological Survey Professional Paper 252.

LEOPOLD J.R. & WOLMAN M.G. (1957)

River channel patterns: Braided, Meandering and Straight
USGS. Professionnal paper, 282-B

LIMERINOS J.T. (1970)

*Determination of the Manning coefficient from mesured bed roughness in
natural channels*
Water Supply Paper 1898-B, USGS

LIN H.S. (1993)

Le transport solide en collecteur unitaire d'assainissement et sa modélisation

Thèse de doctorat - Ecole nationale des ponts et chaussées

LISLE T.E. (1987)

Channel morphology and sediment transport in steepland streams

Erosion and sédiment in the Pacific Rim - IAHS Publication N°165

Corvallis aout 1987

LISLE T.E. & HILTON -(1992)

The volume of fine sediment in pools: an index of sediment supply in gravel-bed streams

Water Resources Bulletin - Vol. 28 - n°2

LITTLE & MAYER (1976)

Stability of channel beds by armoring

JHD - Proc. ASCE - Vol. 102 n° HY11 - Nov. 1976

LOW H.S. (1989)

Effect of sediment density on bed load transport

ASCE, J. Hydr. Eng., Vol. 115, n°1

MALAVOY J.-R. (1992)

Méthodologie de sectorisation et de description des cours d'eau à pente forte et moyenne - Application à une gestion intégrée des écosystèmes d'eau courante.

Thèse de doctorat en géographie et aménagement - Université Jean Moulin - Lyon III

MEUNIER M. (1989)

Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle.

La Houille Blanche n°5

MEUNIER M. (1990)

Etude des transports solides torrentiels

Commision de réhabilitation de la région de Thio - CEMAGREF -Grenoble

MEUNIER M. (1992)

Elements d'hydraulique torrentielle

Etudes Montagne - CEMAGREF - Grenoble

MEUNIER M. & CARION C. (1987)

Etude méthodologique de la détermination des courbes granulométriques des lits des cours d'eau

CEMAGREF Groupement de Grenoble - Avril 1987

MEYER-PETER E. & MULLER R. (1948)

Formulas for bed-load transport

Intern. Assoc. Hydr. Res., 2^d Meeting - Stockholm

MIRAJGAOKER A.G. & CHARLU K.L.N. (1963)

Natural roughness effects in rigid open channels

Proc. ASCE. HY9 - 1963

MIZUYAMA T. (1977)

Bedload transport in steep channels

Ph. D. Dissertation - Kyoto University - Japan

MOHAMEF ABDALLA SHARFI E. S. (1986)

Modélisation mathématique d'évolution des rivières avec prise en compte de la composition granulométrique des matériaux transportés.

Thèse préparée à l'Institut de Mécanique de Grenoble - INPG

MORRIS H.M. (1955)

Flow in rough conduits

Transactions of the ASCE - Vol. 120

NAKAGAWA H., TSUJIMOTO T. AND SHIMIZU Y. (1989)

Turbulent flow with small relative submergence

International Workshop on fluvial hydraulics of mountain regions - TRENTO, ITALIE

ORSBORN & STYPULA (1987)

New models of hydrological and stream channel relationships

Erosion and sediment in the Pacific Rim - IAHS Publication N°165

Corvallis aout 1987

PARKER G. (1978)

Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed 1

The sand-silt river - J. Fluid Mech.

PARKER G. (1978)

Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobil bed 2
The sand-slit river - J. Fluid Mech.

PARKER G. (1989)

Downstream variations of grain size in gravel rivers: abrasion versus selective sorting
International Workshop on fluvial hydraulics of mountains regions - TRENTO, ITALIE

PARKER G. (1990)

Selective sorting and abrasion of river gravel I: Theory
Journal of hydraulic engineering - Vol. 117 - n°2 - February 1991

PARKER G. (1990)

Selective sorting and abrasion of river gravel II: Applications
Journal of hydraulic engineering - Vol. 117 - n°2 - February 1991

PARKER G. & KLINGEMAN P.C. (1982)

On why gravel bed streams are paved
J. Water Resources Research, Vol 18 n°5

PEIRY J.-L. & BRAVARD J.P. (1985)

Approche géomorphologique de la charge du fond et de la charge en suspension de l'Arve
Compte rendu de la réunion du 14/11/85 du Groupe de travail de la SHF: Transport solide - sous groupe Arve.

PETIT F. (1989)

L'influence de la forme des cailloux en tant que facteur de résistance à l'érosion
Revue de géographie de Lyon, Vol. 64, n°4

PETIT & DAXHELET

Détermination du débit à plein bord et de sa récurrence
Bulletin de la société géographique de Liège

PIANESE D. & ROSSI F. (1989)

Morphological changes and grain sorting in mountain gravel-bed streams
International Workshop on fluvial hydraulics of mountains regions - TRENTO, ITALIE

PIZZUTO J.E. (1990)

Numerical simulation of gravel river widening
J. water resources reseach - Vol. 26 - n°9

RAHUEL J.L. (1988)

Modélisation de l'évolution du lit des rivières alluvionnaires à granulométrie étendue
Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble

RAMETTE M. (1979)

Une approche rationnelle de la morphologie fluviale
La Houille Blanche n°8.

RAMETTE M. (1981)

Guide d'hydraulique fluviale
EDF - Laboratoire national d'Hydraulique

RAUDKIVI A.J. & ETTEMA R. (1982)

Stability of armour Layers in Rivers
Journal of the Hydraulics Division - ASCE - Vol. 108 - n°HY9

REITER H. & SCRIVENER O. (1989)

Transport de matériaux solides en conduites
La houille blanche - n°3-4

RICHARD D. (1987)

Le Riu de St Vincent (Pyrénées Orientales) - Etude de bassin versant
Rapport d'étude Ecole Nationale du Genie Rural, des Eaux et des Forêts

RICHARDS K. (1982)

RIVERS - Form and process in alluvial channels
ed. Methuen - London - New York

RICHENMANN D. (1989)

Bed load transport and hyperconcentrated flow at steep slopes
International Workshop on fluvial hydraulics of montains regions - TRENT,
ITALIE

RICKENMANN D. (1990)

Debris flows 1987 in Switzerland: modelling and fluvial sediment transport
Hydrology in mountainous region II - IAHS Publ. n° 193 - 1990

RICKENMANN D. (1990)

Bed load transport capacity of slurry flows at steep slopes
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie, und Glaziologie der Eidgenössischen
Zurich - Suisse

RICHENMANN D. (1992)

Les écoulements hyperconcentrés en matériaux granulaires
Société Hydrotechnique de France - Colloque d'experts crues torrentielles

SAURET (1986)

Synthèse sur les laves torrentielles
C.E.T.E. LCPC.

SHAW J. & KELLERHALS E.B. (1977)

*Paleohydraulic interpretation of antidune bedforms with application to
antidunes in gravel*
Journal of sedimentary petrology Vol. 47 n°1

SHIELDS A. (1936)

*Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die
Geschäbbewegung*
Mitteil.,PVWES - Berlin -n°26

SHILLER E.J. & ROWNEY A.C. (1984)

*Stream bed armouring under known conditions of upstream sediment
input*
Canadian Journal of Earth Science Vol. 21

SHOOK C.A., GILLIES R., HAASS D.B., HUSBAND W.H.W. & SMALL M. (1982)

Flow of coarse and fine sand slurries in pipelines
Journal of pipelines, Elsevier vol. 3

SILVIO G. & PEVIANI A. (1989)

*Modelling short - and long - term evolution of mountain rivers:
an application to the torrent Mallerò (Italy)*
International Workshop on fluvial hydraulics of mountains regions - TRENT,
ITALIE

SIMON L. (1986)

Transport solide de sédiments de granulométrie non uniforme
Mémoire de D.E.A. - Laboratoire National d'Hydraulique - Chatou

SIMONS D.B. & RICHARDSON E.V. (1966)

Resistance to flow in alluvial channels

SMART G.M. & JAEGGI M.N.T. (1983)

Sediment transport on steep slopes

Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie, und Glaziologie
Zurich - Suisse

STÜVE P.E. (1990)

Spatial and temporal variation of flow resistance in an Alpine river
Hydrology in mountainous region I - IAHS Publ. n° 193

SOGREAH (1988)

Seuils de correction torrentielle - étude générale sur modèle réduit
SOGREAH Grenoble - CEMAGREF Grenoble - ONF service RTM CHAMBERY

SOGREAH (1990)

Formule globale de charriage pour les torrents ou rivières à forte pente
SOGREAH Département France - Grenoble

SOGREAH (1992)

Torrent de Saint-Vincent - Etude sur modèle réduit pour l'aménagement d'une plage de dépôt.
Commune de Vernet-les-Bains - Service de Restauration des Terrains de Montagne
Pyrénées Orientales.

SURELL A. (1870)

Etude sur les torrents des hautes Alpes
Paris - Dunod éditeur

SUSZKA L. (1989)

Modification of the transport rate formula for steep chennels
International Workshop on fluvial hydraulics of montains regions - TRENT,
ITALIE

SUZUKI K. & MICHIE M. (1988)

Change of river regime and graded sediment discharge during flood
Proc. of international conference on river regime, hydraulics research, Wallingford

SUZUKI K. & KATO K. (1989)

Mobile armoring of the bed surface in a steep sloped river with gravel and sand mixture

International Workshop on fluvial hydraulics of montains regions - TRENT, ITALIE

TAKAHASHI (1987)

High velocity flow in steep erodible channels

Proc. 22th IAHR Congress, Lausanne - Techn. Session A, pp. 42-53

THOMPSON S.M. & CAMPBELL P.L. (1979)

Hydraulics of the large channel paved with boulders

IAHR, journal of hydraulic research, Vol. 17, n°4, 1979

TSUCHIYA Y. (1963)

Critical tractrice force for gravel mixture

Disastrer Prévention Laboratory of the Kyoto University
Annual Report 6 - July 1963

TSUJIMOTO (1989)

Bed load transport in steep channels

International Workshop on fluvial hydraulics of montains regions - TRENT, ITALIE

VANONI V.A. (1984)

Fifty years of sedimentation

Journal of Hyd. Eng. - ASCE, Vol. 110, n°8, Aug. 1984

WHITTAKER J.C. (1987)

Modelling bed-load transport in steep mountain streams

Erosion and sediment in the Pacific Rim - IAHS Publication N°165 - Corvallis

WHITTAKER J.G. & JAEGGI N.R. (1982)

Origin of step-pool systems in mountain streams

Journal Hyd. Div. - ASCE, Vol. 108, n°HY6

WILLIAMS G.P. (1978)

Bankfull discharge of rivers

Water Resources Research, 14

WILLIAMS G.P. (1978)

Hydraulic geometry of river cross sections - theory of minimum variance
Professional paper - United States Geological Survey, 1029

WOLMAN M.G. (1954)

A method of sampling coarse river bed material
Transactions of the American geophysical union - Vol. 35 - n° 6 - pp. 951-956

YAMAOKA (1962)

An effect of rectangular roughness on bed in the resistance of waterway
Hokkaido development agency's civil engineering laboratory - professional report

YANG C.T. (1989)

Advanced course on fluvial and sediment hydraulics
I.R.T.C.E.S. - Beijing

ZGHEIB (1990)

Large bed element channels in steep mountain stream - Runoff process and slopes Development
Hydrology in mountainous region II - IAHS Publ. n° 193 - 1990



ANNEXE I

APPROCHE DU TRI GRANULOMETRIQUE BASEE SUR UNE FORMULE DE TRANSPORT SOLIDE

COEFFICIENT DE MASQUAGE

Sommaire

1. Objectifs.....	492
2. Utilisation du coefficient de masquage.....	492
2.1. Méthode	492
2.2. Résultats	493
3. Rapport des débits critiques.....	497
3.1. Méthode	497
3.2. Résultats	497
4. Conclusion	499

Table des figures

Figure I-1 : Evolution de l'exposant du coefficient de masquage en fonction du temps pour l'ensemble des essais.....	493
Figure I-2 : Evolution de l'exposant du coefficient de masquage en considérant la granulométrie de base durant les 10 premières minutes puis celle du lit.	495
Figure I-3 : Calcul de l'exposant du coefficient de masquage en considérant la granulométrie transportée.....	496
Figure I-4 : Evolution du rapport de débit critique de la classe granulométrique de la classe i à celui de l'ensemble des matériaux.	497
Figure I-5 : Evolution du rapport de débit critique de la classe granulométrique de la classe i à celui de l'ensemble des matériaux après décomposition de la granulométrie en seulement trois classes.	499

1. OBJECTIFS

Il s'agit de tester les concepts classiquement utilisés pour l'étude du tri granulométrique c'est à dire la combinaison d'une formule de transport solide et d'un coefficient de masquage.

Plutôt que de caler un coefficient de masquage en utilisant un modèle numérique, le choix s'est porté ici sur le calcul de ce coefficient à chaque pas de temps à partir des mesures. Cette démarche permet une première approche des tris granulométriques. Les résultats ainsi obtenus sont présentés ci dessous.

2. UTILISATION DU COEFFICIENT DE MASQUAGE

2.1. Méthode

Il s'agit de mieux appréhender les interactions entre la granulométrie du fond et l'écoulement. Le calcul du coefficient de masquage permet de faire apparaître les interactions granulométriques indépendamment des critères globaux comme la pente, les conditions hydrauliques et même la granulométrie de base, dans la mesure où la formule de transport solide est suffisamment pertinente.

L'approche classique dans les modèles est la suivante :

- l'équation de débit solide est appliquée à chaque classe indépendamment.
- un coefficient correcteur multiplicatif est ensuite affecté soit au seuil de début de mouvement soit au débit solide de chaque classe. Ce coefficient appelé coefficient de masquage s'exprime généralement en fonction du rapport entre le diamètre de la classe granulométrique et le d_{50} (ou le diamètre moyen) de l'ensemble de la courbe. **Dans le cas d'écoulements peu vigoureux, il est préférable de l'appliquer au seuil de transport pour diminuer les troncutures de la courbe granulométrique.**

La formule de SOGREAHE étant la plus pertinente dans le cadre de ces essais, c'est elle qui servira de base au calcul du coefficient de masquage. En effet, l'expression de celui ci est dépendante de la formule de transport solide choisie.

Pour permettre de mieux coller aux essais et pour palier les incertitudes sur le seuil de début de mouvement, celui ci est calculé à chaque étape à partir de la relation concernant l'ensemble des matériaux. Le calcul de Q_0 est effectué à partir de l'équation suivante :

$$\frac{Q_s}{Q} = 2.7 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} I^{1.5} \left(1 - \left(\frac{Q_0}{Q} \right)^{0.375} \right)$$

Ensuite, à partir des paramètres concernant chaque classe granulométrique (débit solide, diamètre médian, fraction à la surface du lit), le seuil de début de transport concernant la classe considérée est calculé en appliquant l'équation précédente à la

seule fraction considérée. Cependant, le coefficient d_{90} / d_{30} conserve la valeur correspondante à l'ensemble de la courbe.

Enfin, l'exposant α est calculé pour chaque classe granulométrique et à chaque pas de temps à partir de la relation :

$$\frac{Q_{oi}}{Q_0} = \left(\frac{d_i}{d_{30}}\right)^\alpha$$

Dans ce cas, l'égalité de mobilité est obtenue pour une valeur nulle de α alors que l'absence de masquage correspond à $\alpha=5/2$.

2.2. Résultats

L'évolution de α doit donc permettre une approche plus fine du tri granulométrique en corrigeant l'effet des variations des conditions hydrauliques et en ne considérant que le comportement d'une classe par rapport à l'ensemble du matériau. La figure suivante montre le résultat d'un tel calcul pour les trois classes granulométriques suivantes :

- 6.3 - 10.0 mm
- 1 - 1.6 mm
- 0.2 - 0.3 mm

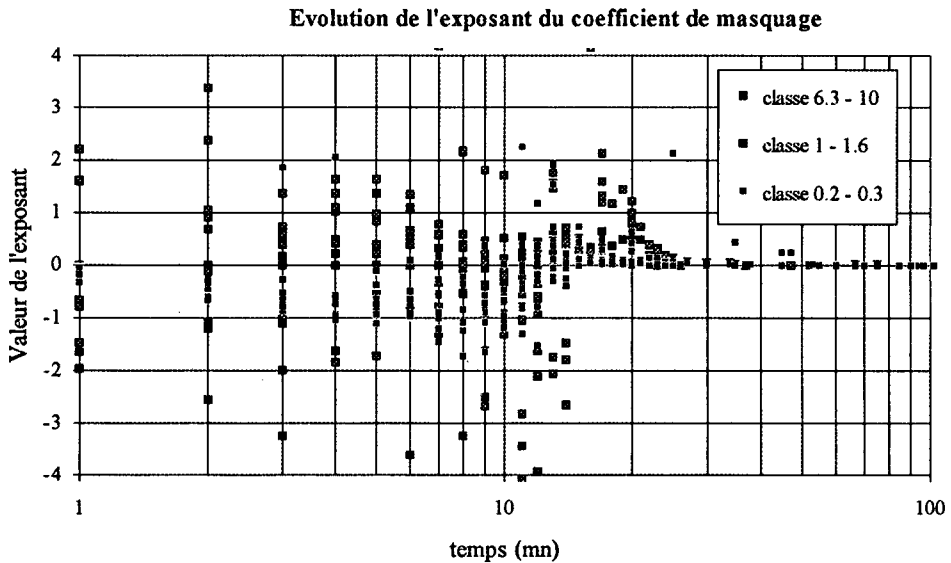


Figure I-1 : Evolution de l'exposant du coefficient de masquage en fonction du temps pour l'ensemble des essais.

L'évolution du coefficient de masquage en fonction de la taille des éléments est très régulière : trois classes suffisent donc pour avoir une bonne idée du comportement du lit durant les essais¹. Il est alors possible de faire les remarques suivantes :

- Toutes les valeurs de α ne sont pas confondues, ni en fonction de la taille des grains, ni en fonction du temps : la méthode consistant à utiliser une telle expression n'est pas adaptée à ces essais.
- Dans l'ensemble, les valeurs sont proches de 0 : la mobilité est donc assez peu dépendante de la taille des éléments.
- Les coefficients se rapprochent de 0 lorsque le transport devient très faible. En effet, dans ce cas, tous les débits critiques de début de mouvement sont très proches du débit liquide : les différences entre les classes granulométriques sont alors gommées par cette approche.
- Pour les gros éléments, il est possible de retrouver les trois phases des essais. Durant la période de fort transport, l'exposant est plutôt négatif : les gros sont encore plus facilement transportés que l'ensemble des éléments. Ensuite, durant la phase de formation du lit, ils deviennent moins facilement transportables : l'exposant augmente et, dans l'ensemble, devient positif. Enfin, lorsque le transport solide devient négligeable, l'exposant tend vers 0.
- Les éléments fins (de 0.2 à 0.3 mm de diamètre) montrent une évolution du coefficient α du même type que pour les éléments grossiers. Cependant, cela correspond à une évolution inverse de leur facilité de déplacement : Ils sont dans ce cas moins facilement transportés qu'avec l'égale mobilité. Au contraire, lorsque la formation du pavage commence, l'exposant devient positif : les éléments fins voient leur mobilité augmenter dans cette phase.
- Les grains de taille intermédiaire (1 à 1.6 mm) montrent une grande dispersion. Ce résultat n'est pas surprenant : le rapport d_i / d_{50} est alors très proche de 1 : l'exposant qui y est affecté peut alors varier dans des proportions considérables. Plusieurs coefficients calculés dépassent d'ailleurs 200! Une interprétation des résultats obtenus est alors particulièrement hasardeuse.
Cependant, dans la première phase des essais, ils se distinguent des deux classes granulométriques précédentes : l'exposant est proche de 0, témoignant ainsi d'une mobilité proche de celle de l'ensemble des matériaux. On retrouve là un résultat obtenu par de nombreux chercheurs : la mobilité d'un matériau de granulométrie étendue est de l'ordre de celle du d_{50} ². Lorsque vers 10 mm le d_{50} du lit s'approche de 1 mm, le coefficient n'est plus significatif, mais avec l'augmentation du d_{50} du lit, il reprend rapidement une très nette signification : la mobilité des grains de taille moyenne devient assez faible.

¹ Au contraire de la présentation concernant l'indice de mobilité relative, chacune des 3 classes ne correspond pas à un regroupement de plusieurs classes d'étendue plus réduite. Ici, il s'agit de 3 des douze classes mesurées qui sont représentatives du comportement d'ensemble. En effet, il n'y a pas de rupture du comportement d'une classe à l'autre, mais seulement une évolution progressive en fonction de la taille des grains.

² En fait il s'agirait plutôt du diamètre moyen. Cependant, les connaissances sont encore assez sommaires pour que la distinction entre les deux diamètres (moyen et médian) n'ait pas été dégagée de façon certaine. Ces explications sont donc aussi valables pour le d_m (qui est généralement de l'ordre du d_{70}).

Ces remarques sont basées sur des calculs liés à la granulométrie du lit. Or, pendant la phase d'injection des matériaux la principale source d'éléments est constituée par les apports amont.

La figure suivante montre les résultats des calculs réalisés en considérant la granulométrie des matériaux injectés.

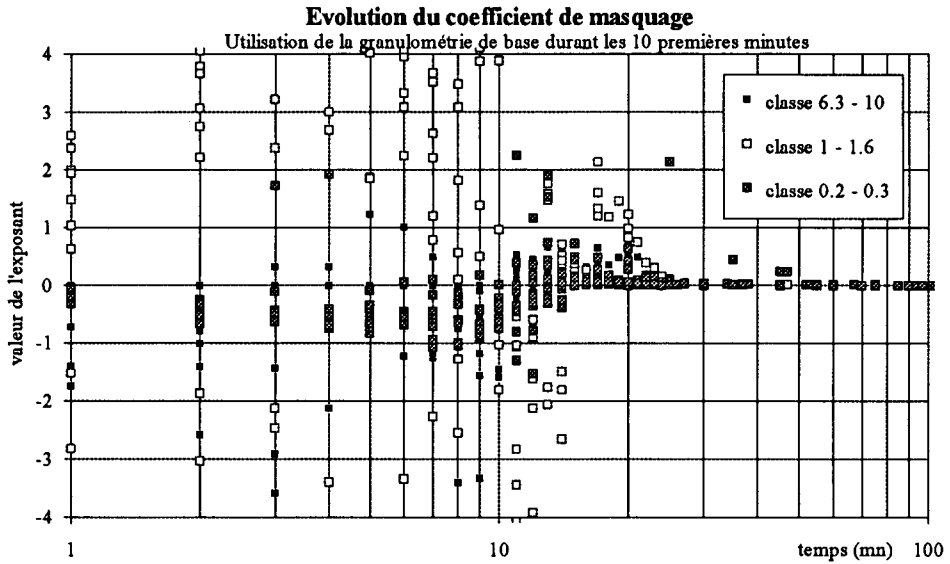


Figure I-2 : Evolution de l'exposant du coefficient de masquage en considérant la granulométrie de base durant les 10 premières minutes puis celle du lit.

Pour les classes granulométriques de 6.3 et de 0.2 mm, il n'y a pas d'évolution sensible. Au contraire, pour les éléments de la classe de 1 mm, proche du d_{50} , la différence est très importante et témoigne de la grande sensibilité de ce calcul. Il n'est pas possible d'en tirer de conclusion significative.

Enfin, une dernière approche consiste à prendre en considération la granulométrie transportée, considérant alors que ce sont les interactions entre les grains en mouvement qui sont les plus importantes (voir figure suivante).

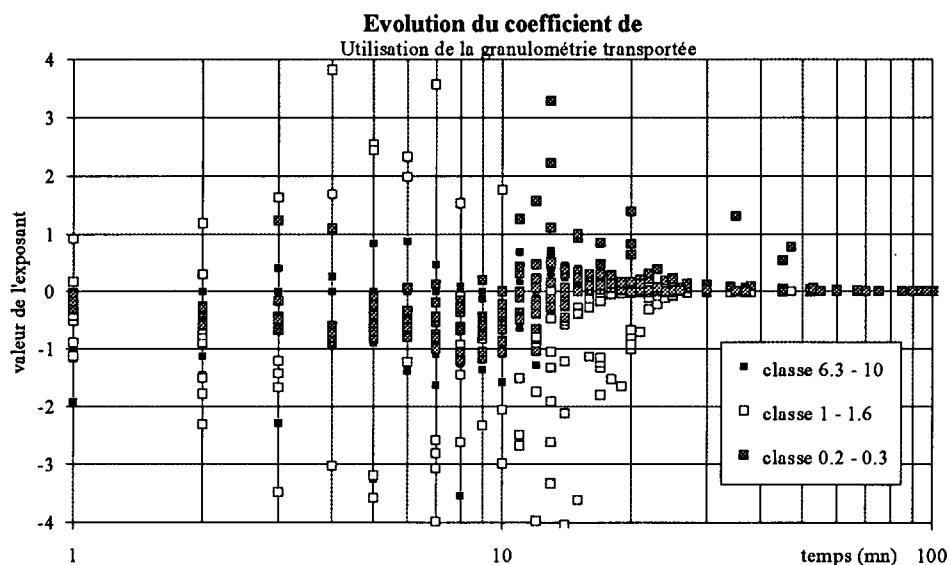


Figure I-3 : Calcul de l'exposant du coefficient de masquage en considérant la granulométrie transportée.

Là encore, il n'y a pas d'évolution significative, sauf pour les grains les plus fins. En effet, en phase ultime de pavage, ce sont essentiellement les éléments fins qui sont transportés. Ainsi, la différence avec la prise en compte de la granulométrie du lit apparaît essentiellement lorsque le débit solide devient très faible.

Finalement, ces calculs d'exposant de coefficient de masquage présentent une certaine robustesse sauf lorsque l'on se rapproche du d_{50} . Ils ont montré un fonctionnement en trois phases durant les essais :

1. Dans un premier temps, les gros et surtout les éléments de taille intermédiaire se déplacent très facilement. Cette phase correspond à un fort transport solide sous des conditions hydrauliques rigoureuses. Les éléments fins ont une plus grande difficulté à se déplacer dans ce cas.
2. Ensuite, les gros perdent leur facilité de déplacement. Dans ce cas, ils commencent à s'arrêter et augmentent la rugosité de l'écoulement. Les moyens ont alors la possibilité de s'arrêter plus facilement : pour eux aussi, la mobilité relative diminue. Au contraire, les éléments fins peuvent alors se déplacer avec une plus grande facilité.

Tout se passe comme si, pour une capacité de transport limitée, les éléments grossiers avaient priorité : les fins ne peuvent bouger facilement que lorsque les plus gros s'arrêtent. Cette relative limitation du débit solide de fins peut s'expliquer par la hauteur de la couche de transport : en effet, si les éléments grossiers sont transportés, ils protègent les fins de l'écoulement. Dans ce cas, le débit solide de petits éléments est forcément limité.

3. Enfin, lorsque le débit solide devient très faible, l'approche par le coefficient de masquage ne permet pas de mieux comprendre le phénomène : les débits critiques

de toutes les classes granulométriques sont presque égaux au débit liquide : l'exposant du coefficient de masquage est forcément nul.

3. RAPPORT DES DEBITS CRITIQUES

3.1. Méthode

Le calcul de l'exposant du coefficient de masquage rend l'exploitation des résultats difficile à cause des évolutions du rapport d_i/d_{50} . Le problème est d'autant plus important que ce rapport se rapproche de 1. De plus, l'effet est inverse, si le paramètre est supérieur ou inférieur à l'unité.

Il semblait donc intéressant de suivre la même démarche que précédemment mais en arrêtant le calcul au rapport débit critique de la classe i / débit critique de l'ensemble de la granulométrie.

L'objectif d'une telle démarche reste de mieux comprendre les évolutions granulométriques qui se produisent dans le canal, en particulier entre 10 et 20 mn après le début de l'essai.

3.2. Résultats

La figure suivante montre une telle évolution toujours pour les trois classes précédentes :

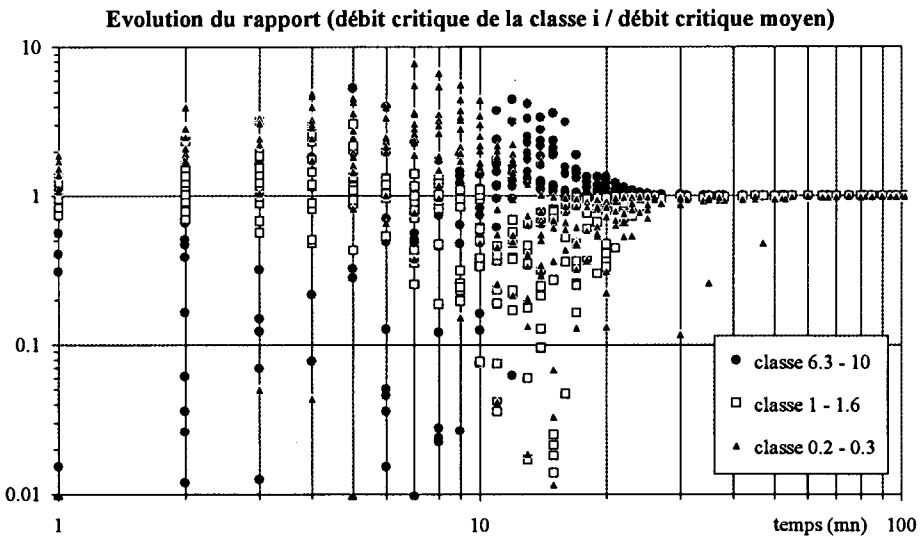


Figure I-4 : Evolution du rapport de débit critique de la classe granulométrique de la classe i à celui de l'ensemble des matériaux.

Un rapport supérieur à 1 témoigne d'une mobilité de la classe granulométrique plus faible que pour l'ensemble des matériaux. Au contraire, un coefficient inférieur à l'unité traduit une plus grande facilité de déplacement.

Les trois phases des essais apparaissent nettement :

1. Dans les dix premières minutes, les éléments grossiers sont facilement déplacés et évacués du canal alors que les éléments fins sont beaucoup moins mobiles durant toute cette phase. Le maximum de faible mobilité des fins est atteint vers 8 mn. Le débit critique ainsi calculé est alors environ 5 fois plus fort que pour l'ensemble des éléments. Cependant, c'est pour les éléments moyens que l'évolution est la plus complexe. Peu mobiles au tout début de l'essai, ils deviennent de plus en plus faciles à transporter à partir de 6 mn, anticipant ainsi la seconde phase de forte mobilité. Cette évolution n'était pas clairement visible en considérant l'évolution du coefficient de masquage.
2. D'après cette approche, la seconde phase commence très progressivement et avant la fin de l'alimentation en matériaux. Il semble en effet que les matériaux grossiers et moyens changent de comportement à partir de $T=5$ mn. Il est cependant difficile de savoir s'il s'agit d'un effet de l'évolution du débit liquide ou si cela correspond à une évolution du lit. Dans cette seconde phase de formation du pavage, la mobilité des éléments grossiers diminue rapidement, pour atteindre un débit critique deux à trois fois plus faible que l'ensemble des matériaux. Cette évolution a commencé presque en même temps que l'augmentation de mobilité des éléments moyens et un peu avant celle des éléments fins.
3. la troisième phase des essais échappe largement à ce type d'approche. Dans ce cas, les débits critiques se rapprochent du débit liquide, masquant les évolutions du lit. On observe que les éléments sont d'autant moins mobiles qu'ils sont gros. Cette évolution correspond bien à l'évolution de la granulométrie sortante. Les éléments moyens et les fins ont la même évolution en fonction du temps mais avec un décalage d'une trentaine de minutes dans le cadre de ces essais. Pour les éléments grossiers, l'évolution semble inverse. Cependant, il n'y a pas de changement de comportement des éléments les plus gros, mais une augmentation du débit critique pour l'ensemble des matériaux.

Cette approche a montré la continuité des évolutions granulométriques entre les trois phases des essais. les variations sont beaucoup moins nettes que pour le débit solide total.

Une dernière approche consiste à partager la granulométrie en seulement trois classes et à calculer la moyenne du rapport des débits critiques pour les quatre classes formant une catégorie³.

La figure suivante montre le résultat d'un tel calcul :

³ C'est la démarche qui a été suivie pour le calcul - et l'interprétation - de l'indice de mobilité relative.

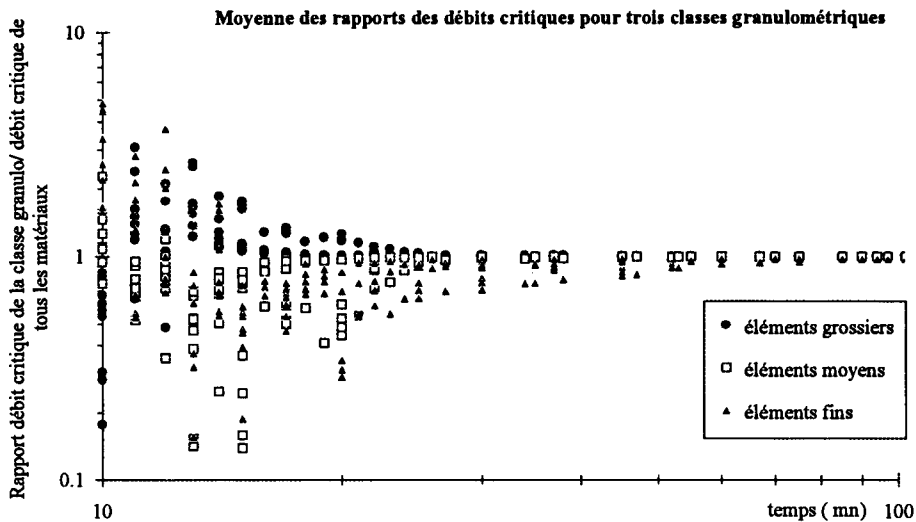


Figure I-5 : Evolution du rapport de débit critique de la classe granulométrique de la classe i à celui de l'ensemble des matériaux après décomposition de la granulométrie en seulement trois classes.

Les résultats ainsi obtenus sont moins variables et représentent une plus forte fraction de la granulométrie transportée. Il s'agit là de la seule différence notable avec l'approche précédente. Elle confirme alors que les variations d'une classe à l'autre sont régulières et progressives. Il n'y a donc pas de rupture de comportement pour une taille d'éléments particulière.

4 . CONCLUSION

Finalement, ces approches basées sur l'utilisation d'une formule de transport solide sont mal adaptées à ce type d'étude. En effet, les calculs du débit critique à partir des observations, puis éventuellement de l'exposant d'un coefficient de masquage de la forme $(\frac{d_i}{d_{50}})^\alpha$ rendent les résultats difficilement lisibles et interprétables. C'est pourquoi l'approche par l'indice de mobilité relative a été préférée.

Cependant, les très fortes variations montre que, dans le cadre de la formation d'un pavage torrentiel, l'utilisation d'un coefficient de masquage de ce type est sans rapport avec les phénomènes physiques. Les essais réalisés constituent cependant une gamme de conditions hydrauliques trop réduites pour pouvoir établir une nouvelle expression d'un coefficient de masquage (avec - peut être - l'apparition de seuil pour prendre en compte les différents phénomènes physiques qui se produisent dans le lit).



ANNEXE II

AJUSTEMENT SUIVANT UNE LOI A TROIS PARAMETRES

PRINCIPALES CORRELATIONS

Sommaire

1. Objectifs.....	501
2. Paramètres d'ajustement	502
2.1. Définition des paramètres.....	502
2.2. Erreur d'ajustement	503
3. Relations entre les paramètres granulométriques	505
3.1. Les déciles	505
3.2. Les paramètres d'ajustement	507
3.3. les liens entre les deux types de paramètres.....	507
4. Conclusion	509

1. OBJECTIFS

La répartition granulométrique d'un matériau correspond toujours à une courbe. Cependant, elle n'est guère utilisable sous cette forme. Ainsi, on définit quelques paramètres significatifs, permettant de traduire cette diversité. Les plus courants sont les suivants :

- les déciles et en particulier led_{10} , le d_{30} , le d_{50} et le d_{90} . S'y ajoute, d'autres paramètres tels que le diamètre moyen d_m .
- Les paramètres correspondant à une loi de répartition. c'est le cas par exemple de la moyenne et de l'écart type pour une loi normale.

L'objectif de cette annexe est double :

1. détailler les méthodes employées et les résultats obtenus en ajustant la courbe granulométrique à une loi à trois paramètres.

2. analyser les liens entre les différents paramètres granulométriques afin de dégager les plus pertinents et de tenter d'établir une relation entre ces coefficients et les caractéristiques morphologiques du lit.

2. PARAMETRES D'AJUSTEMENT

2.1. Définition des paramètres

Pour limiter l'effet des erreurs de mesure et obtenir des paramètres reflétant les caractéristiques de l'ensemble de la courbe granulométrique, le lissage de celle-ci a été réalisé. Si en rivière la répartition granulométrique correspond bien à une loi Log-normale, celle-ci est mal adaptée au cas des torrents, en particulier à cause de la forte représentation relative des fines.

On a donc mis au point un mode de représentation de la granulométrie des torrents en admettant qu'elle suit une loi log-normale, à l'exception de la classe des éléments fins (moins de 1 cm de diamètre).

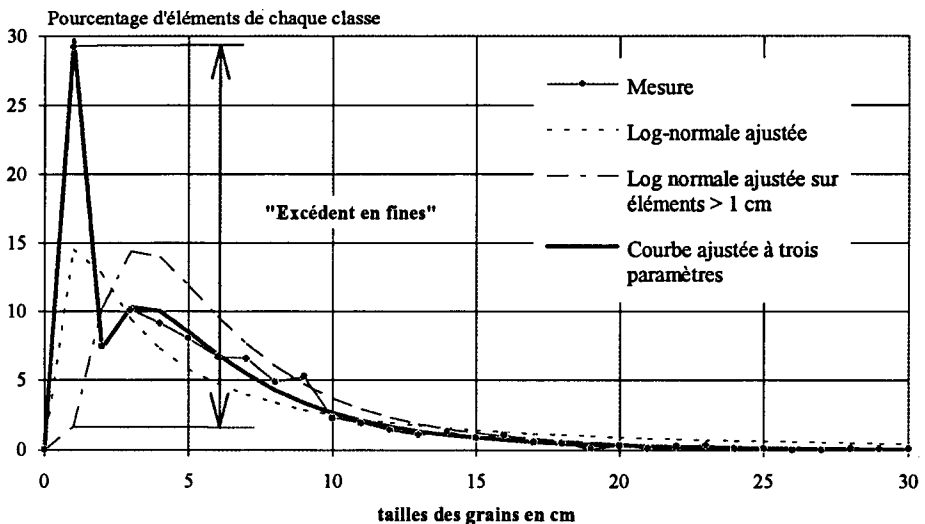


Figure II-1 : Principe de l'ajustement d'une loi à trois paramètres à partir d'un exemple sur le *Torrent des Glaciers*.

Ainsi, l'ajustement se fait en deux temps :

1. dans une première étape, un échantillon fictif est réalisé par l'agglomération de l'ensemble des valeurs de plus d'un centimètre de diamètre et d'un taux d'éléments fins arbitraire. Le calcul de la moyenne et de l'écart type est alors effectué. Une répartition Log-normale est ajustée à l'ensemble de la population ainsi créée.

Ensuite, l'écart entre la population initiale et la distribution Log-normale ajustée est calculé sur l'ensemble des valeurs à l'exception des éléments de moins de 1 cm. Ce paramètre, appelé erreur d'ajustement, est égal à la somme des valeurs absolues des différences entre les fréquences de chaque classe. C'est donc un nombre qui varie entre 0 (ajustement parfait) et 2 (aucune correspondance entre les deux distributions).

La valeur retenue pour la fréquence de la première classe est celle qui minimise l'écart entre les deux distributions. La moyenne et l'écart type correspondants sont conservés. Il est donc nécessaire de procéder par itérations successives.

2. Enfin, la différence entre le nombre d'éléments fins mesurés et celui nécessaire à l'ajustement fournit le pourcentage d'éléments fins excédentaires. C'est un nombre positif ou - plus rarement - négatif.

Par la suite, ce sont les trois paramètres suivants qui sont retenus pour décrire la granulométrie :

- L'excédent de fines exprimée en %,
- La moyenne d'ajustement : exponentiel de la moyenne des log. des diamètres,
- L'écart type d'ajustement : exponentiel de l'écart type des log. des diamètres.
- S'y ajoute l'erreur d'ajustement qui correspond à l'écart entre population de référence et loi Log-normale retenue.

Ils ont l'avantage de bien coller à la plupart des mesures et d'avoir une signification physique lors de l'interprétation. En effet, l'excédent en fines semble directement lié au transport en suspension alors que les deux autres paramètres sont plutôt caractéristiques du charriage (voir paragraphe 2.2.3).

2.2. Erreur d'ajustement

La prise en compte de l'erreur d'ajustement permet de chiffrer l'écart entre la répartition Log-normale avec excédent en fines et la répartition mesurée.

Une première approche montre que l'erreur d'ajustement augmente avec la taille des éléments comme le montre la figure suivante :

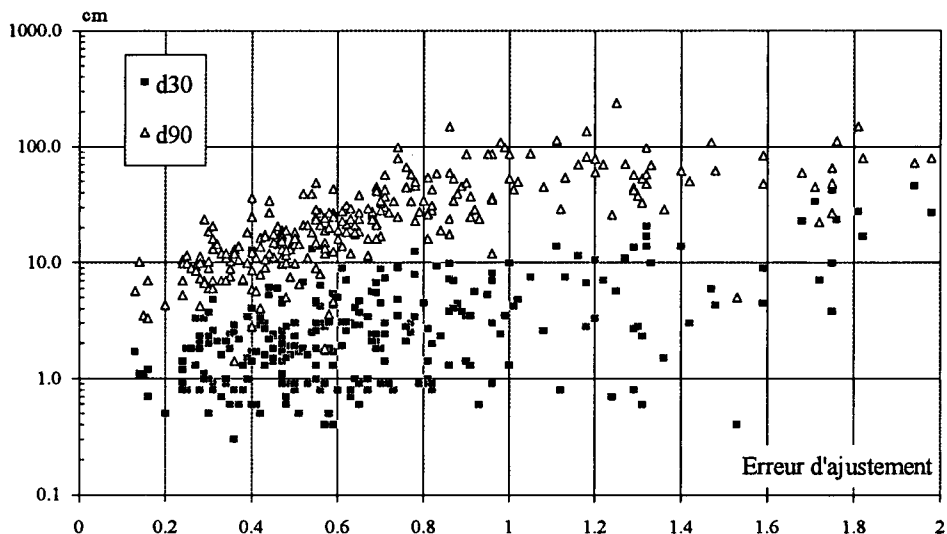


Figure II-2 : Augmentation de l'erreur d'ajustement avec la tailles des grains.

Il est cependant difficile de connaître la cause de cette évolution :

- L'augmentation de la taille des éléments diminue l'effectif dans chaque classe et entraîne une répartition plus irrégulière des fréquences. La comparaison par rapport à la distribution régulière générée par la répartition Log-normale entraîne une erreur d'ajustement particulièrement importante. Cette irrégularité de la distribution est particulièrement nette pour les seuils où un effectif réduit se combine avec une grande étendue granulométrique. Les graphiques précédents montrent qu'ils correspondent aux erreurs d'ajustement les plus importantes.
- D'autre part, cette influence de la taille des éléments s'explique peut être par le choix arbitraire entre éléments fins et éléments charriés correspondant à une loi Log-normale. En effet, il est probable que lorsque la taille des éléments du lit augmente, celle des éléments en suspension suive la même évolution.

Cependant, il semble délicat de modifier cette frontière :

1. Il est difficile de connaître la limite de taille des éléments en suspension dans le lit d'un torrent, où la turbulence est extrême et où les irrégularités du fond ne sont plus négligeables.
 2. La détermination statistique de ce seuil nécessiterait des moyens de calcul déraisonnables et surtout, il serait difficile de savoir si le gain sur l'ajustement serait dû à une meilleure prise en compte des phénomènes physiques ou à l'ajout d'un paramètre.
- Les fortes granulométries correspondent à un écoulement vigoureux et à un fort lavage. Or, on a vu que dans ce cas, la courbe granulométrique se rapproche d'une droite (en coordonnées linéaires) : il n'est alors pas étonnant que l'erreur d'ajustement soit alors importante.

Enfin, l'excédent en fines ne montre aucun lien avec l'erreur d'ajustement. Ainsi, il existe une grande indépendance entre les éléments de moins de un cm et la partie supérieure de la courbe. Cette constatation justifie, *a posteriori*, le choix d'un ajustement distinguant les éléments fins du reste de la courbe granulométrique.

3. RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES GRANULOMETRIQUES

Ce paragraphe est destiné à mettre en lumière les liens entre les différents paramètres afin d'en réduire le nombre nécessaire à l'interprétation.

3.1. Les déciles

Les quatre déciles les plus courants ont été retenus pour décrire la courbe granulométrique : d_{10} , d_{30} , d_{50} et d_{90} .

L'ensemble des mesures montre une très grande variabilité puisque le rapport entre la plus grande et la plus faible valeur est de plusieurs centaines pour chacun des déciles. Cette constatation est renforcée par l'importance des coefficients de variation comme le montre la figure suivante :

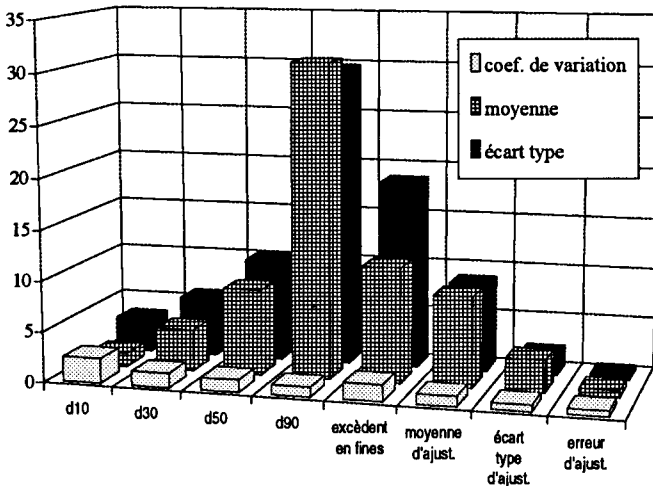


Figure II-3 : Coefficients de variation des différents paramètres granulométriques.

On remarque, que les déciles inférieurs (en particulier le d_{10}) sont, en valeur relative, les plus difficiles à déterminer. Cette constatation confirme les résultats obtenus au chapitre 3 lors des tests concernant les tailles d'échantillons : un décile est d'autant plus difficile à déterminer qu'il est éloigné de la médiane (d_{50}).

Les liens entre les déciles sont, évidemment, d'autant plus étroits que les déciles sont proches. D'autre part un effet de plafond très net apparaît entre les différents déciles : Il est bien évident, par exemple, que le d_{30} est toujours inférieur au d_{50} . De plus, il apparaît une très grande diversité de formes de courbes granulométriques : pour un d_{50} fixé, le d_{30} peut varier dans un rapport de 1 à 8.

Des tentatives de corrélation entre les différents paramètres montrent qu'une régression linéaire sur les log. des déciles est la plus pertinente. On obtient alors des relations du type :

$$\begin{aligned} d_{30} &= 3.3 * d_{10}^{0.9} && \text{avec } R^2=0.79 \\ d_{50} &= 2.1 * d_{30}^{1.05} && \text{avec } R^2=0.83 \\ d_{90} &= 5.9 * d_{50}^{0.8} && \text{avec } R^2=0.67 \\ d_{90} &= 12 * d_{30}^{0.6} && \text{avec } R^2=0.47 \end{aligned}$$

Ces résultats montrent que si le d_{10} , le d_{30} et le d_{50} sont pratiquement proportionnels (avec une forte dispersion), le d_{90} est plus indépendant des autres déciles (l'exposant n'est plus que de 0,8 dans la relation avec le d_{50} et la variance expliquée diminue nettement). Il semble donc que les courbes granulométriques se comportent différemment de part et d'autre de la médiane, la fraction la plus grossière étant moins dépendante des autres déciles.

Cette situation peut s'expliquer par la double condition concernant les éléments les plus gros : Il faut qu'ils puissent être transportés mais aussi qu'ils soient fournis au torrent par les versants. Cette dernière condition n'est pas toujours vérifiée.

Cependant, ces relations ne doivent pas faire illusion : la dispersion entre les déciles reste considérable (plus d'une décade) :

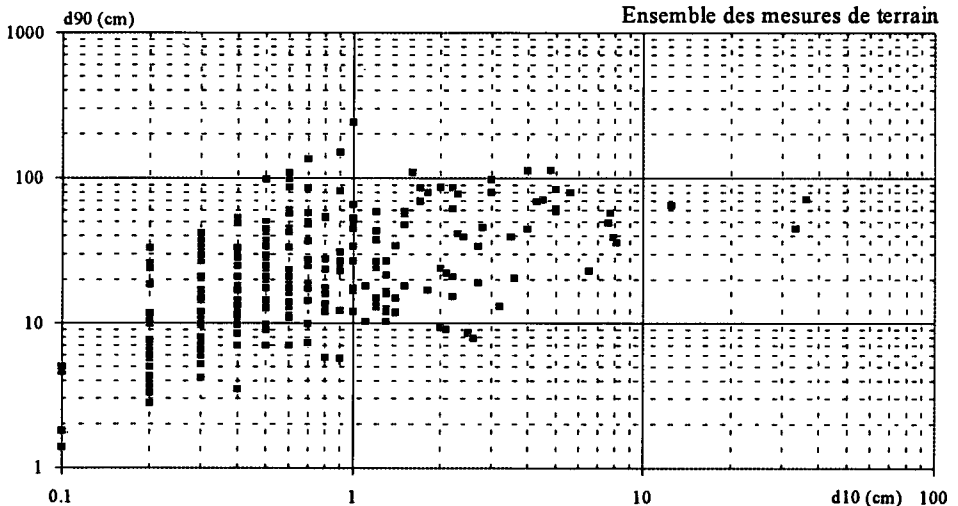


Figure II-4 : d_{90} en fonction du d_{10} pour l'ensemble des mesures de terrain.

3.2. Les paramètres d'ajustement

Les paramètres d'ajustement sont évidemment plus indépendants entre eux que les déciles. Cependant, il apparaît une relation assez nette entre l'excédent en fines et les deux autres paramètres comme le montre la figure suivante :

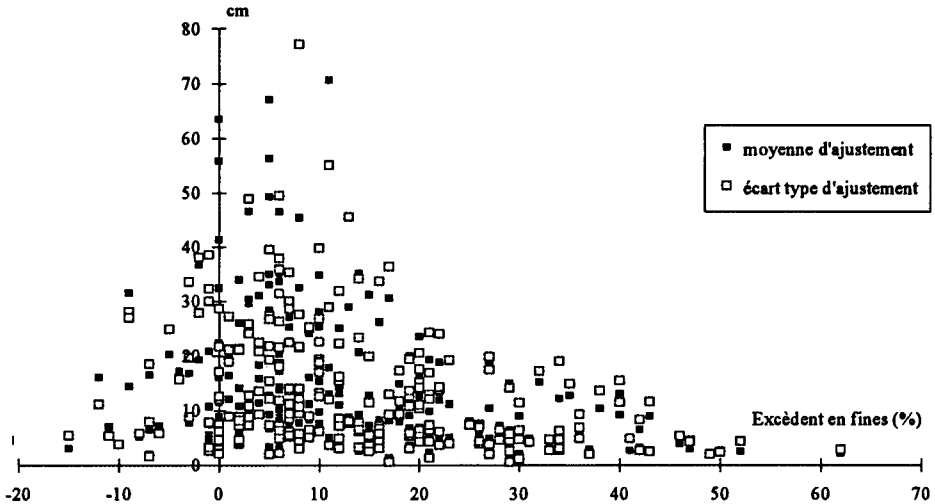


Figure II-5 : moyenne et écart type d'ajustement en fonction de l'excédent en fines pour l'ensemble des mesures de terrain.

Il est possible d'en tirer les conclusions suivantes :

- L'excédent en fines ne peut être important que lorsque la moyenne d'ajustement est faible. Dans le cas contraire, l'ensemble des matériaux est de taille élevée et il n'y a pas, dans les torrents mesurés, une répartition assez hétérogène pour permettre une forte concentration en éléments fins. Il semble donc qu'il y ait une certaine continuité au cours du temps dans l'intensité des écoulements.
- De même, les valeurs les plus fortes de l'excédent en fines ne sont atteintes que lorsque l'écart type d'ajustement est faible : dans ce cas, la distribution Log-normale entraîne un faible pourcentage de fines. Il est donc normal qu'alors, pour certaines distributions, l'excédent en fines soit important. C'est une caractéristique purement mathématique.

3.3. les liens entre les deux types de paramètres

La confrontation des déciles avec les paramètres d'ajustement permet de mieux comprendre la signification de ces derniers.

Ainsi, l'excédent en fines ne peut être importante que si le d_{10} est réduit comme le montre la figure ci dessous :

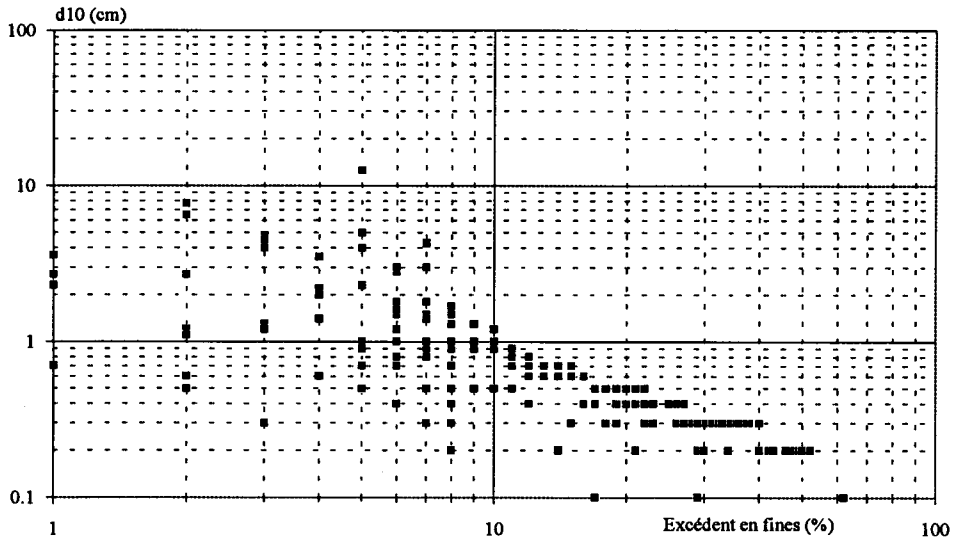


Figure II-6 : plafonnement de l'excédent en fines en fonction du d_{10} pour l'ensemble des mesures de terrain.

Ce plafonnement s'explique facilement : il faut que le pourcentage d'éléments de moins de un cm soit grand pour que l'excédent en fines soit important. Il est alors nécessaire que le d_{10} soit faible.

D'autre part, la moyenne d'ajustement montre un lien très net avec le d_{50} comme le montre la figure ci dessous :

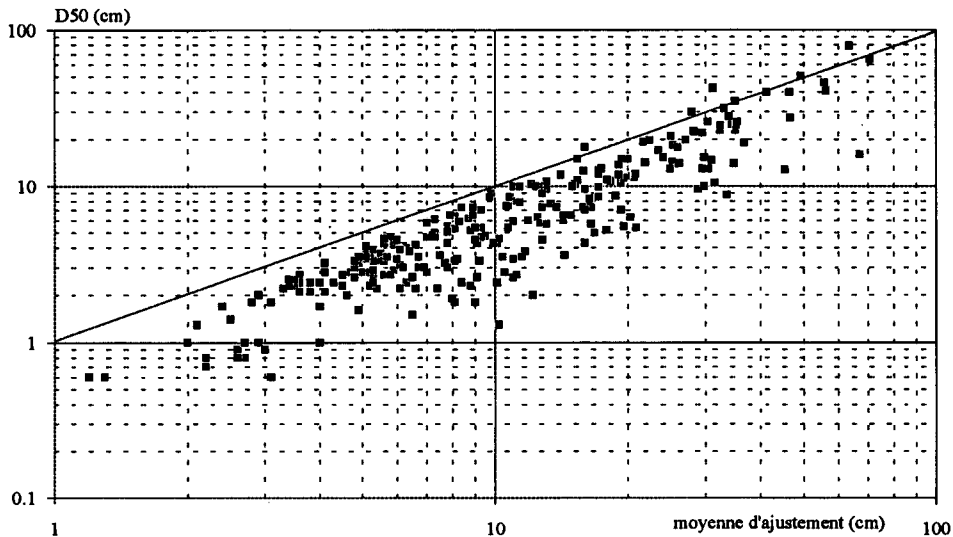


Figure II-7 : d_{50} en fonction de la moyenne d'ajustement pour l'ensemble des essais.

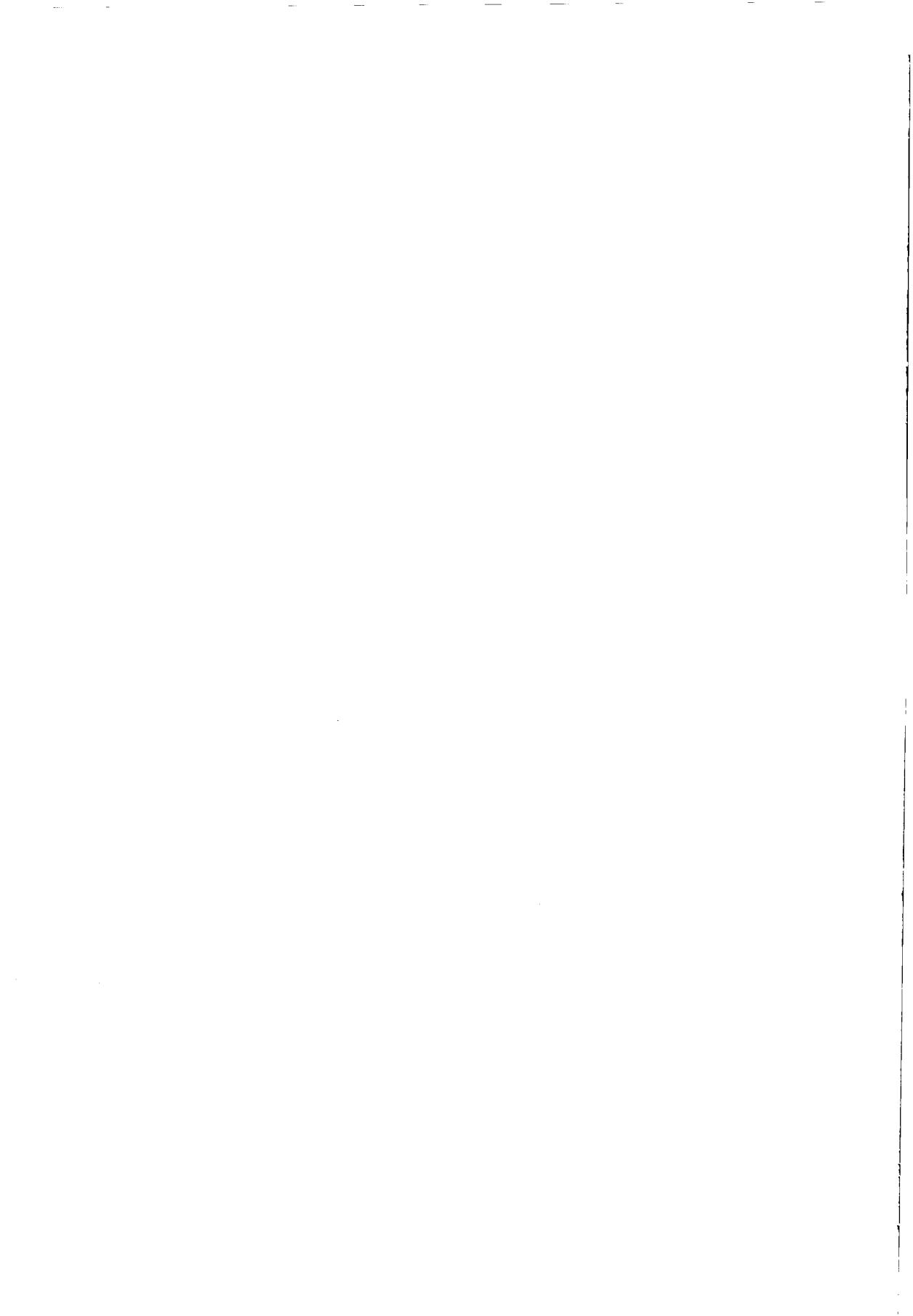
Il faut noter que les points isolés sont peu significatifs car ils correspondent à des erreurs d'ajustement importantes. Evidemment, la dispersion augmente lorsque les déciles considérés s'éloignent du d_{50} .

Enfin, l'écart type d'ajustement augmente lorsque le d_{10} diminue et que le d_{90} croit. Cependant, il s'agit d'un plafonnement qui ne concerne que les valeurs extrêmes. La dispersion est considérable comme le montrent les liens entre les déciles : le d_{10} et le d_{90} augmentant de pair (figure II-4), ils ne peuvent évoluer dans des sens contraires en fonction de l'écart type d'ajustement que si ces relations sont particulièrement lâches.

4. CONCLUSION

Finalement, les courbes granulométriques montrent une nette continuité et il n'est pas apparu de relations privilégiées entre les différents paramètres autres que celles directement issues des définitions statistiques employées.

De plus, une recherche systématique a été réalisée. Cependant, il n'a pas possible de mettre en évidence de relations particulière à une morphologie.



ANNEXE III

CALCUL DES CONDITIONS HYDRAULIQUES LOCALES

Sommaire

1. Objectifs	512
2. Calcul des débits	513
2.1. Période de retour retenue.....	513
2.2. Méthode de calcul.....	513
2.3. Valeurs retenues	514
3. Calcul des conditions hydrauliques locales	515
3.1. Calcul avec section mouillé de proportions constantes.....	515
3.1.1. Equation de Strickler	515
3.1.2. Ecoulement critique.....	516
3.1.3. Equation de Smart & Jaeggi	516
3.1.4. Comparaison des différentes approches.....	516
3.2. Calcul avec largeur fixe.....	517
3.2.1. Choix de la largeur du lit.....	517
3.2.2. Résultats obtenus.....	517

1. OBJECTIFS

Il semble intéressant d'établir un lien entre l'hydrologie du torrent et les caractéristiques de son lit. En effet, cette liaison est réelle, un torrent des Alpes du sud n'ayant pas la même morphologie qu'un autre de Savoie. Si les conditions géologiques expliquent en partie cette différence, il est probable que la climatologie du bassin versant intervient. Il s'agit donc, à l'aide d'une étude hydrologique sommaire, de comparer les conditions hydrauliques locales à la granulométrie. Cette confrontation est basée sur le **diamètre maximal des grains pouvant être transportés en suspension** afin de mieux cerner la séparation entre suspension et charriage et sur le **seuil de début de mouvement des grains** pour déterminer quel décile est le plus représentatif de l'ensemble des matériaux.

Les résultats correspondant à cette démarche sont exposés au paragraphe 7.7.

Cette annexe est uniquement destinée à détailler le calcul des conditions hydrauliques locales. Ce calcul comprend deux étapes :

1. L'étude hydrologique qui conduit à la détermination du débit pour plusieurs périodes de retour ;
2. Le calcul du jeu de paramètres hauteur - vitesse - largeur pour le calcul de la contrainte de cisaillement. Cette étape est nettement plus difficile et il a été nécessaire de confronter plusieurs hypothèses.

2. CALCUL DES DEBITS

2.1. Période de retour retenue

Les débits liquides suivants ont été retenus :

1. **module inter-annuel.**
2. **plus fort débit mensuel moyen.** Ce paramètre est destiné à prendre en compte l'effet des écoulements tels que ceux correspondant à la fonte des neiges qui restructurent en détail le lit.
3. **crue bi-annuale.** Elle caractérise les débits capables de remanier le lit sans en détruire les éléments structurants.
4. **crue décennale.** Il s'agit là d'appréhender les fortes crues pouvant bouleverser l'ensemble du lit.

Les crues de temps de retour plus élevé ont probablement un rôle considérable dans la morphologie "à grande échelle" du torrent mais influent peu sur les caractéristiques morphologiques, plus locales, prises en compte ici car elles sont probablement rapidement "gommées" par des crues plus fréquentes.

2.2. Méthode de calcul

Il n'y a pas de station hydrométrique exploitable sur aucun des torrents où les mesures granulométriques ont été réalisées. Cette constatation traduit deux réalités : le faible nombre de torrents jaugés et la difficulté de mesure du débit liquide lorsque le transport solide est important (c'est le cas de tous les torrents retenus).

Il est donc nécessaire d'extrapoler des données obtenues à partir d'autres cours d'eau. Pour les débits moyens (annuels ou mensuels), cette démarche pose peu de difficulté, les valeurs moyennes étant obtenues rapidement après quelques années de fonctionnement de la station de mesure. De plus, l'extrapolation à d'autres bassins - proportionnelle à la surface - est moins difficile.

Pour les crues, au contraire, une plus grande durée de mesure est nécessaire pour obtenir des valeurs fiables. De plus, l'extrapolation est plus difficile car une multitude de facteurs rentrent en considération, y compris - pour les torrents - le transport solide. Deux démarches ont été suivies :

1. prendre en considération le torrent le plus proche possible (géographiquement mais aussi au niveau des caractéristiques du bassin versant ou de la pluviométrie). Hélas, ces "cousins" n'existent pas toujours et leurs séries de mesures sont généralement trop courtes pour obtenir une bonne estimation des crues.
2. considérer la rivière la plus proche même si le bassin versant est de l'ordre de plusieurs centaines de km² sous réserve que les pluies soient comparables. Les séries sont alors nettement plus longues et leur précision peut compenser la différence avec le torrent considéré.

En fait, étant donné la pénurie de données, ces deux méthodes ont été employées, les débits de crue étant considérés comme proportionnels à la superficie du bassin versant à la puissance 0,9, ce qui correspond bien au cas des bassins versants de faible taille. Les résultats ainsi obtenus sont du même ordre "hydrologique", c'est à dire dans un

rapport de 1 à 2. Par exemple, pour *l'Infernet* dont le bassin versant couvre 6 km², deux stations ont été utilisées :

- Le torrent du *Crachet* distant d'un km, sur le même versant, avec une taille de bassin versant comparable (3.5 km²). Il n'y a alors que 9 années de mesures disponibles.
- *L'Ubaye* à *Barcelonnette* dont le bassin versant est de 549 km² mais pour laquelle les mesures sont disponibles depuis 1904.

Pour chacune des deux stations, les débits bi-annual et décennal sont obtenus par ajustement d'une loi de Gumbel suivant la méthode du maximum de vraisemblance.

les résultats obtenus par extrapolation pour *l'Infernet* sont alors les suivants :

	<i>Crachet</i>	<i>Ubaye</i>	
Exposant associé à la surface du B.V.	0.9	0.9	0.8
Débit bi-annual (m ³ /s)	1.5	1.3	2.1
Débit décennal (m ³ /s)	1.8	2.2	3.5

L'écart entre les débits de *l'Infernet* calculés à partir des données issues du *Crachet* et celles issues de *l'Ubaye* est - dans ce cas - inférieur à celui obtenu en utilisant un exposant 0.8 au lieu de 0.9 pour le rapport des superficies du bassin versant. Finalement, les valeurs obtenues à partir du *Crachet* sont conservées.

2.3. Valeurs retenues

D'une manière identique à celle exposée pour *l'Infernet*, des résultats ont été obtenus sur d'autres torrents. Ils sont dans le tableau suivant :

	Surface (Km ²)	Débit (m ³ /s)			
		bi - annual	décennal	moyen annuel	moyen mensuel
<i>Infernet</i>	6	1.5	1.8	0.12	0.4
<i>Torrent des Glaciers</i>	58	15	23	2.4	6.7
<i>Malsanne</i>	10	2.4	4.1	0.3	0.7
<i>St Vincent</i>	13	15	32	0.48	1.27
<i>Béoux :</i>					
<i>Pierre taillée</i>	7.4	2.7	5.5	0.17	0.4
<i>aval zone mesure</i>	31	9	18	0.72	1.7
<i>Torrent de Rabioux</i>	6.5	2.6	4.9	0.15	0.3
<i>Cerveyrette :</i>					
<i>Les Fonds</i>	23	6.3	9.7	0.6	1.6
<i>Dépôt inférieur</i>	39	8	12	1	2.8
<i>Rabioux</i>	53	16	29	1.5	4.7

3. CALCUL DES CONDITIONS HYDRAULIQUES LOCALES

Il est nécessaire d'approcher les conditions hydrauliques de façon plus locale et donc de déterminer les caractéristiques locales de la section mouillées. Or, ces paramètres n'ont pas été relevés sur le terrain, car leur détermination était très difficile, étant donnée l'absence de lien entre la géométrie du lit à faible débit et celle durant les crues. Il est donc nécessaire de faire des hypothèses sur les conditions d'écoulement. Toutes les mesures ont été réalisées dans des sites où le torrent à la possibilité d'adapter la largeur du lit aux conditions d'écoulement. On peut donc utiliser les résultats obtenus sur la morphologie des lits alluviaux, comme ceux de RAMETTE par exemple (voir le chapitre 2 consacré à l'étude bibliographique).

3.1. Calcul avec section mouillée de proportions constantes

On admet dans ce paragraphe que la section mouillée a une largeur 18 fois plus grande que la hauteur pour tous les écoulements. Une fois déterminer les dimensions du lit mineur, il reste nécessaire de choisir une formule de perte de charge.

Plutôt que de choisir arbitrairement une formule, différentes approches ont été réalisées afin de mettre en lumière la difficulté du calcul des conditions hydrauliques.

3.1.1. Equation de Strickler

Pour un premier calcul, on considère que la perte de charge est bien représentée par l'équation de Strickler. Cependant, en torrent, il est indispensable de prendre en considération les particularités d'un écoulement à forte pente, en particulier les effets de la rugosité de forme. Il a été fait l'hypothèse que ces pertes d'énergie sont proportionnelles à la seule rugosité de peau, c'est à dire au d_{90} . Cela revient à diviser le coefficient K par une valeur constante. Cette constante a été déterminée de façon à obtenir une bonne correspondance avec les vitesses calculées par la suite à partir des équations de Smart & Jaeggi. Finalement, K (donc les vitesses) a été divisé par 2. on doit alors résoudre le système suivant :

$$K = \frac{1}{2} 25 d_{90}^{-1/6}$$

$$U = K(2 \cdot h + B)^{2/3} I^{1/2} \dots \dots \dots (III-1)$$

$$Q = UBh$$

$$B = 18h$$

afin de déterminer V, B, h en fonction du d_{90} et de Q.

On trouvera la liste des symboles utilisés, leur dimension et leur signification dans les premières pages de ce travail.

On peut ensuite calculer la puissance unitaire d'écoulement (produit vitesse \times pente), la contrainte de cisaillement et la taille des éléments correspondant à la contrainte limite de Shields.

D'autre part, la taille limite des éléments pouvant être transportés en suspension a été déterminée en égalant la vitesse de chute des particules et la vitesse de frottement (voir paragraphe 2.2.3).

3.1.2. Ecoulement critique

Les conditions correspondant à un écoulement critique (nombre de Froude égal à 1) ont été déterminées pour les débits moyens. On a, en effet, observé sur modèle, qu'à partir de quelques % de pente, le nombre de Froude se rapproche de l'unité lorsque le lit est stable, mais peut être supérieur dans le cas d'un charriage hyperconcentré. Ainsi, les valeurs correspondant à un écoulement critique n'ont pas été retenues pour les débits de crue car ils correspondent pas à des conditions d'équilibre, et l'écoulement est capable de s'éloigner des conditions critiques, même au prix d'un transport solide considérable. Le jeu d'équation est alors le suivant :

$$\begin{aligned}
 U &= \sqrt{gh} \\
 Q &= UBh \dots\dots\dots (III-2) \\
 B &= 18h
 \end{aligned}$$

Les limites d'un tel calcul sont nettement mise en évidence si l'on remarque que le seul paramètre intervenant est le débit liquide!

3.1.3. Equation de SMART & JAEGGI

Une autre démarche utilise les équations de SMART & JAEGGI concernant les conditions d'écoulement. Il s'agit d'un calcul itératif faisant intervenir l'effet du transport solide sur l'écoulement du mélange. La concentration en matériaux solides nécessaire à l'évaluation du débit total a été calculée par la formule :

$$C = 6.3 * P^2 \dots\dots\dots (III-3)$$

les conditions d'écoulement sont alors déterminées par :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2.5(1 - \exp(0.05 \frac{h_m}{d_{90}}))^{0.5} \ln(\frac{8.2h_m}{d_{90}}) \dots\dots\dots (III-4)$$

Lors des crues, cette approche est particulièrement bien en accord avec la physique des phénomènes se produisant sur les lieux de mesure. Mais ce calcul n'a pas été réalisé pour les écoulements moyens (annuels et mensuels).

3.1.4. Comparaison des différentes approches

La comparaison entre ces différentes méthodes de calcul des conditions hydrauliques montre que :

- les vitesses obtenues à partir des équations de SMART & JAEGGI présentent une dispersion nettement supérieure à celle obtenue par les deux autres méthodes (Strickler et conditions critiques). C'est sans doute l'effet des variations considérables des paramètres granulométriques. En effet la granulométrie est sans effet sur la vitesse critique et le d_{90} est pris en compte par la formule de Strickler mais seulement à la puissance 1/6 alors qu'elle à un poids bien supérieur dans la formule de SMART & JAEGGI.

- Les vitesses obtenues sont de l'ordre de la vitesse critique. Pour les 220 granulométries retenues, la *moyenne* du nombre de Froude, quel que soit le débit considéré et la méthode employée, est toujours comprise entre 0,9 et 1,1. Cependant, là encore, la prise en compte des caractéristiques granulométriques conduit à une forte variabilité puisque le nombre de Froude peut varier, d'un site à l'autre, dans un rapport de 1 à 10.
- le temps de retour a peu d'influence sur la vitesse et encore moins sur le nombre de Froude. Cette indépendance s'explique partiellement par la possibilité donnée au torrent d'adapter sa section au débit liquide. Or, étant donnée la rapidité des crues, ce refaçonnage des berges n'est probablement pas toujours assez rapide. D'autre part, les faibles débits (moyenne annuelle) ne sont pas suffisants pour remodeler un lit, même de proportions plus réduites. Ils empruntent alors le lit formé par les crues précédentes. C'est pourquoi un second calcul considérant une largeur indépendante du débit a été réalisé.

3.2. Calcul avec largeur fixe

Le calcul des conditions hydrauliques en considérant que la largeur de l'écoulement est indépendante du débit liquide (correspondant à un rapport largeur / hauteur de 18 pour la crue bi-annuale) a donc été réalisé. Il est cependant nécessaire de choisir une largeur du lit.

3.2.1. Choix de la largeur du lit

Si les proportions de la section sont issues des études de Ramette, la notion de débit dominant formant le lit est aussi adoptée par cet auteur (c'est d'ailleurs uniquement dans ce cas que la section a de telles proportions).

Il n'est pas nécessaire de déterminer avec une grande précision le débit formant le lit. En effet, les conditions hydrauliques et les proportions de la section d'écoulement ne sont pas très variables avec le temps de retour de la crue. D'autre part, aucune étude n'a dégagé un temps de retour précis correspondant au débit dominant, cette notion ne faisant pas l'unanimité et restant assez floue.

Cependant, il semble que le temps de retour correspondant varie entre 1 et 10 ans. C'est donc la crue bi-annuale qui est retenue ici. Il convient de noter cependant que, pour les torrents, la concentration en matériaux est sans doute un paramètre de premier ordre pour expliquer l'influence d'une crue sur la morphologie du lit.

3.2.2. Résultats obtenus

Il est clair que la prise en compte d'une largeur indépendante du débit conduit à une légère augmentation de la vigueur des écoulements durant les crues de temps de retour supérieur à deux ans mais à une forte réduction de la hauteur (donc de la contrainte de cisaillement) et de la vitesse pour les écoulements "moyens".

Cette réduction conduit à des valeurs proches de la moitié de celles obtenues dans le calcul précédent. Cependant, il ne s'agit que d'une faible variation par rapport à celle des paramètres granulométriques.

Si ces résultats semblent plus proches de la réalité, il faut probablement considérer que la plupart des torrents ont un comportement intermédiaire : la largeur du lit varie avec le débit, mais pas suffisamment pour conserver les proportions de la section mouillée.

La confrontation des valeurs ainsi obtenues et des granulométries en place est exposée au paragraphe 7.7.

ANNEXE IV

EBAUCHE D'UN MODELE DE TRI GRANULOMETRIQUE BASE SUR L'INDICE DE MOBILITE RELATIVE

Sommaire

1.Objectif.....	520
1.1. Intérêt du modèle numérique.....	520
1.2. Instabilité des phénomènes.....	520
1.3. Objectifs de cette annexe.....	521
1.4. Paramètres retenus.....	521
2.Modélisation basée sur l'indice de mobilité relative	523
2.1. Premier test du modèle en utilisant les valeurs mesurées de l'indice de mobilité relative	523
2.2. Choix des paramètres explicatifs.....	524
2.3. Explication de l'indice de mobilité relative par la fraction grossière du lit	525
2.3.1. Ajustement.....	525
2.3.2. Résultat des simulations	528
2.4. Explication de l'indice de mobilité relative de chaque classe granulométrique par sa fraction dans le lit.....	531
2.4.1. Ajustement.....	531
2.4.2. Résultat des simulations	531
3.Modélisation de la probabilité de mouvement d'ensemble	533
3.1. Objectif.....	533
3.2. Ajustement de la probabilité d'ensemble.....	533
3.3. Simulation.....	535
4. Période de lessivage du lit	537
5. Conclusion	538

1 . OBJECTIF

1.1. Intérêt du modèle numérique

Les essais sur modèle réduit "ponctuel" (chapitre 4) ont permis d'approcher finement les tris granulométriques correspondant au charriage torrentiel. Il est apparu des phénomènes physiques très instables : une classe granulométrique est d'autant plus mobile qu'elle est peu représentée dans le lit. L'ensemble écoulement + lit a alors un comportement bascule alors irréversiblement vers un lit peu mobile constitué d'éléments grossiers ou vers un lit fin et un très fort transport solide. Cette propriété correspond à la "bistabilité granulométrique du charriage torrentiel".

D'autres séries d'essais en canal de plus grande dimension (chapitre 5 & 6) ont montré que cette "bistabilité" engendrait une forte hétérogénéité spatiale des caractéristiques du charriage torrentiel et pouvait expliquer le comportement - apparemment aléatoire - du torrent.

Il semble alors possible de prévoir - en se basant sur les résultats quantitatifs et locaux obtenus sur modèle "ponctuel" - de quantifier les divagations d'un torrent. L'intérêt d'un tel résultat n'est pas à démontrer.

Or il semble que seul un modèle numérique est capable d'étendre les connaissances ponctuelles à une échelle plus vaste échelle. Ainsi, le développement d'un tel modèle est particulièrement prometteur.

1.2. Instabilité des phénomènes

Cependant, il n'était pas possible, lors des essais réalisés sur modèle ponctuels, de couvrir une gamme de conditions opératoires assez étendue pour obtenir un jeu d'équation complet des phénomènes (voir chapitre 8).

Ainsi, les paramètres mesurés et retenus concernent essentiellement les liens entre la granulométrie transportée et celle du lit. Or, les phénomènes régulateurs du tri granulométrique (conditions hydrauliques et amas de matériaux de granulométrie resserrée) n'ont pas pu être quantifiés avec la même finesse que les interactions granulométriques (il apparaît une différence d'échelle assez marquée entre ces phénomènes régulateurs - très ponctuels et évoluant rapidement - et les mesures de granulométrie réalisées).

Ainsi, la construction d'un modèle numérique basé sur ses observations revient à modéliser un phénomène physiquement instable à partir des seules équations traduisant son instabilité, sans faire intervenir celles correspondant à une régulation.

Ainsi, cette modélisation présentera une instabilité encore accrue par rapport au phénomène physique. Ainsi, pour pouvoir reproduire avec une chance de succès les phénomènes observés, il est indispensable de ne jamais "s'éloigner" des mesures, la moindre imprécision dans les conditions initiales ou dans la modélisation du tri granulométrique conduisant à un modèle totalement divergent. Cette limitation est

encore accrue par les très fortes évolutions du fonctionnement du torrent (débit solide évoluant dans un rapport de 1 à 1000).

1.3. Objectifs de cette annexe

L'objectif d'un modèle prédictif du fonctionnement d'un torrent n'est donc pas accessible pour l'instant, par manque d'équations pertinentes sur les phénomènes physique. Cependant, il semble intéressant, de construire une première ébauche de modèle afin d'explorer cette voie prometteuse, l'objectif n'étant pas d'obtenir une simulation satisfaisante, mais plutôt de tester la sensibilité du modèle et de mieux comprendre les phénomènes.

Le modèle est destiné à simuler l'évolution du lit pendant les deux dernières phases du transport solide : *formation du pavage* et *lessivage du lit*.

- La première de ces deux phases se traduit par une forte évolution de la granulométrie du lit suite à un transport solide important. L'objectif est de reproduire ce changement de granulométrie. Il semble que les caractéristiques du lit évoluent assez rapidement pour pouvoir expliquer - au moins en partie - le transport solide. Elle est l'objet des paragraphes 2 et 3.
- La seconde phase concerne uniquement le lessivage du lit sans restructuration globale de la surface. Aucun des paramètres globaux du lit ne change durant cette période. Là encore, il est nécessaire de distinguer les deux phases. Pour l'étape de lessivage, étant donné que le lit n'évolue pas, seule une représentation en fonction du temps depuis le début de l'essai peut être envisagée. La simulation de ce lessivage du lit est uniquement destinée à mieux le comprendre. Il est en effet totalement exclu d'appliquer les résultats obtenus durant cette phase à des situations réelles. En effet, cette étape est extrêmement dépendante des conditions extérieures (en particulier des apports solides amont). Il n'y a donc aucun lien - à conditions hydrauliques constantes - entre des essais très particuliers réalisés en laboratoire et les phénomènes naturels.
 Cette modélisation est décrite au paragraphe 4.

1.4. Paramètres retenus

Le chapitre 4 a mis en évidence deux paramètres pour l'étude du tri granulométrique tout deux directement liée à l'hypothèse de la couche active :

- **La probabilité d'arrachement** d'une classe granulométrique en un pas de temps est égale au rapport du débit solide de la classe i par la masse de la classe i dans la couche active :

$$p_i = \frac{Q_{si}}{\Delta t M_i} = \frac{Q_{si}}{\Delta t \cdot \rho_s \cdot n \cdot L \cdot B \cdot E \cdot a_i} \dots\dots\dots (IV-1)$$

Avec

- M_i : masse de la classe i dans la couche active
- L : longueur du canal
- a_i : fréquence de la classe i dans la couche active
- n : indice de porosité de la couche active (on a considéré $\rho_s n = 1.7$)

Δt : pas de temps considéré

On a défini de la même façon la probabilité de mouvement de l'ensemble des matériaux :

$$p = \frac{Q_s}{M} = \frac{Q_s}{\rho_s \cdot n \cdot L \cdot B \cdot E} \dots \dots \dots (IV-2)$$

M : masse totale de la couche active

Cependant, ce paramètre connaît de très fortes variations directement liées au transport solide. Cette constatation n'est pas surprenante car les variations du débit solide sont près de mille fois supérieures à celles du pourcentage d'éléments de chaque classe granulométrique.

Evidemment, les évolutions des probabilités de mouvement de chaque classe granulométrique suivent aussi des évolutions de 1 à 10^5 , c'est à dire beaucoup trop importantes pour pouvoir être facilement utilisées.

- **L'indice de mobilité relative** moins variable et répondant à ces objectifs. D'où la définition suivante :

$$m_i = \frac{p_i}{p} = \frac{Q_{si}}{a_i Q_s} = \frac{1}{a_i} \frac{Q_{si}}{Q_s} = \frac{t_i}{a_i} \dots \dots \dots (IV-3)$$

Avec t_i : fraction de la classe i dans la granulométrie transportée.

Ce paramètre indique la mobilité des éléments de la classe i par rapport à l'ensemble des matériaux :

- $m_i < 1$, la classe i est moins mobile que la moyenne des autres classes.
- $m_i = 1$, la classe i a le même comportement que la moyenne des autres classes.
- $m_i > 1$, la classe i est plus mobile que la moyenne des autres classes.

La définition de ces paramètres montre clairement que c'est l'indice de mobilité relative qui traduit le mieux les évolutions du tri granulométrique car ce paramètre traduit uniquement la mobilité d'une classe par rapport au autre, indépendamment du débit solide.

Ainsi, une assez bonne estimation du volume de matériaux arrachés pour chacune des classes peut conduire à une évolution du lit peu conforme à la réalité car une très faible erreur d'estimation sur le volume peut privilégier une classe granulométrique par rapport à une autre et entraîner un écart important.

Au contraire, la simulation basée sur l'indice de mobilité relative ne présente pas cet inconvénient car elle rend directement compte du tri granulométrique. Elle permet donc d'espérer une simulation plus satisfaisante.

Comme durant l'analyse des phénomènes au chapitre 4, la granulométrie est décomposée en seulement en trois classes.

La modélisation va donc être réalisée suivant deux paramètres :

1. **indice de mobilité** : modélisation du tri granulométrique à partir de la composition du lit et utilisation des mesures de débit solide;
2. **probabilité d'arrachement** : le tri granulométrique et le débit solide sont déterminés à partir de la composition du lit.

2. MODELISATION BASEE SUR L'INDICE DE MOBILITE RELATIVE

On ne considère dans ce paragraphe - et dans le suivant - que l'évolution durant phase de pavage des essais.

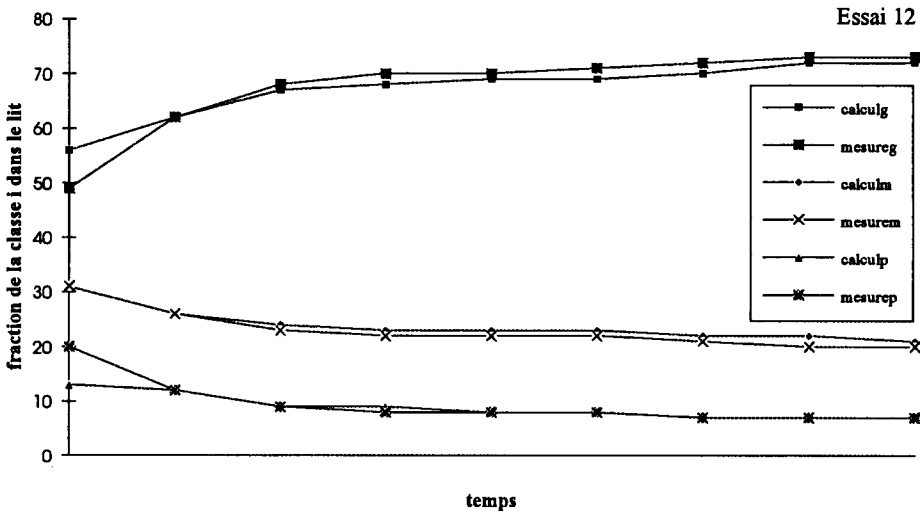
2.1. Premier test du modèle en utilisant les valeurs mesurées de l'indice de mobilité relative

Un modèle permet de reproduire l'évolution de la granulométrie du lit en fonction de l'indice de mobilité relative de chaque classe granulométrique a été écrit.

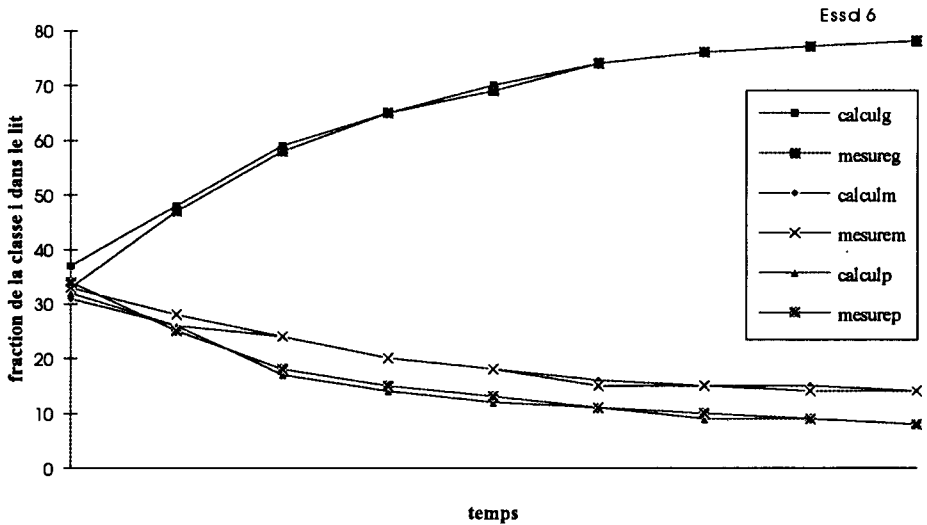
On a d'abord utilisé les valeurs mesurées de l'indice de mobilité relative pour tester la faisabilité d'un modèle reproduisant un phénomène aussi instable. En effet, ce modèle ne fait que reproduire les essais à partir des valeurs qui ont été mesurées, sans qu'aucun ajustement soit utilisé. Il s'agit uniquement du test de l'algorithme utilisé.

Les erreurs de calcul et d'arrondi expliquent des écarts d'environ 1% entre les fréquences dans le lit de chaque classe mesurée et celles qui ont été calculées.

La figure suivante compare la granulométrie de chaque classe dans le lit calculée à celle qui a été mesurée. Il s'agit de l'essai 12 qui présente les plus mauvais résultats. Les essais en canal court sont évidemment les plus difficiles à reproduire car ils présentent l'évolution la plus rapide.



La figure suivante montre la même évolution mais pour l'essai 6. On remarquera que dans ce cas, l'évolution granulométrique est beaucoup plus importante et que les trois classes granulométriques présentent des fréquences voisines à la fin de la phase d'injection de matériaux :



Ainsi, le modèle numérique est capable de reproduire les essais sur modèle réduit. Dans une seconde étape, on ne va plus utiliser l'indice de mobilité relative mesuré mais celui obtenu par ajustement à partir des caractéristiques du lit.

La première démarche consiste à déterminer les paramètres décrivant la composition granulométrique du lit qui expliquent le mieux les variations de l'indice de mobilité relative.

2.2. Choix des paramètres explicatifs

Il est donc possible d'établir une relation entre l'indice de mobilité relative de chacune des classes et le pourcentage des trois classes granulométriques dans le lit. Initialement, deux jeux de paramètres explicatifs ont été retenus :

1. Les fractions des trois classes granulométriques des éléments du lit. Cette méthode qui permet une description aussi fine que possible du lit doit permettre un bon ajustement.
2. La fraction d'une seule classe granulométrique dans le lit. Cette démarche, plus simple, se justifie par la très forte interaction entre les classes granulométriques dans le lit.

Le tableau suivant présente le pourcentage de variance expliqué en fonction du choix du paramètre explicatif dans le cadre d'une relation linéaire entre les paramètres. Il correspond à une relation du type :

$$\text{Indice de mobilité relative}_{\text{classe } i} = \alpha + \beta (\text{fréquence dans le lit})_{\text{classe } j} \dots\dots\dots (\text{IV-4})$$

Les valeurs barrées du pourcentage de variance expliqué correspondent à une évolution non linéaire :

Indice de Mobilité des éléments :	fraction d'éléments dans le lit				(lit (grands)) ²
	grands	moyens	petits	3 fractions	
Grands	75	69	45	76	71
Moyens	66	73	32	76	72
Petits	71	54	50	70	75

On remarquera qu'il n'y a pas de paramètre explicatif nettement privilégié même si les éléments grossiers jouent un rôle légèrement plus déterminant (caractères gras).

L'introduction des autres pourcentages granulométriques de chacune des classes dans le lit n'a pas été retenue. En effet, l'ajout de la fraction d'une seconde ou d'une troisième classe n'apporte pas un complément d'information mais seulement une instabilité des coefficients (parce que ces la somme des trois fractions granulométriques est égale à 100%).

Une autre formulation considérant le logarithme de l'indice de mobilité permet d'obtenir de bons résultats. Elle correspond à une relation du type :

$$\text{LOG}(\text{Indice de mobilité relative}_{\text{classe } i}) = A + 10^{-3} \times B (\text{fréquence dans le lit})_{\text{classe } j}$$

..... (IV-5)

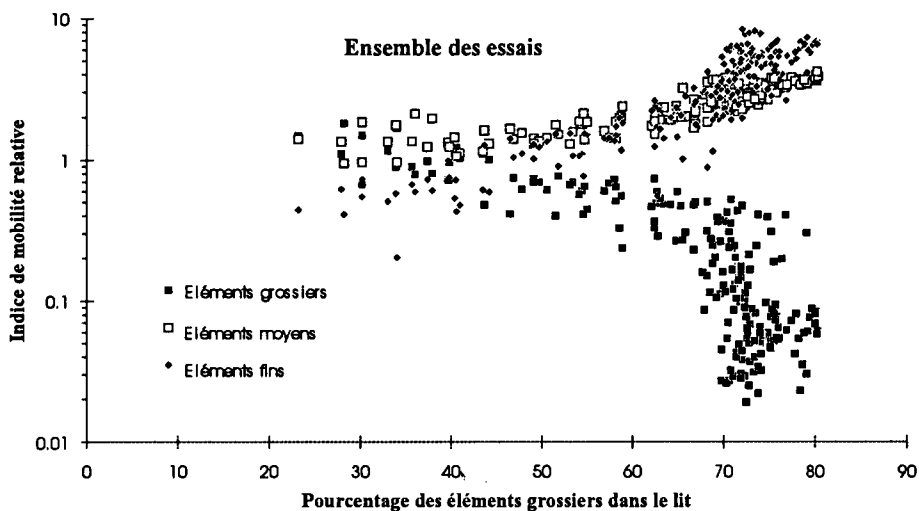
LOG (Indice de Mobilité des éléments)	Fraction d'éléments dans le lit :		
	grands	moyens	petits
grands	72	68	42
moyens	69	80	32
petits	79	66	51

C'est finalement le Logarithme de l'indice de mobilité relative qui va être expliqué par le pourcentage d'éléments grossiers dans le lit ou par celui de la classe i. Une telle formulation présente l'avantage d'être identique pour toutes les classes granulométriques. Le mauvais ajustement entre la mobilité des éléments fins et leur représentation dans le lit s'explique par la disparité entre les essais.

2.3. Explication de l'indice de mobilité relative par la fraction grossière du lit

2.3.1. Ajustement

Pour l'indice de mobilité relative, les calages de début de la phase de pavage ont été réalisés à partir du graphique suivant :



Cependant, pour ne prendre en considération que la phase de formation du lit, seuls les points correspondant à une probabilité de mouvement d'ensemble en une minute supérieure à 0.02 ont été retenus. Cette valeur correspond au coude formé par chacune des courbes sur le schéma précédent.

Les ajustements ont été obtenus avec pour toutes les classes par la relation (IV-4). Les valeurs correspondant à chacun des paramètres sont tracées à la figure 1.

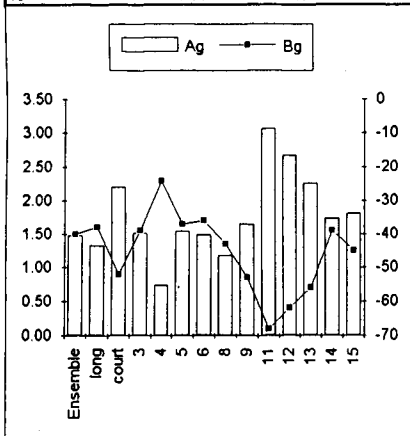
L'avantage de l'utilisation de l'indice de mobilité relative est de ne pas faire apparaître d'écart important entre les essais courts et les essais longs contrairement au traitement considérant la probabilité de mouvement.

figure 1

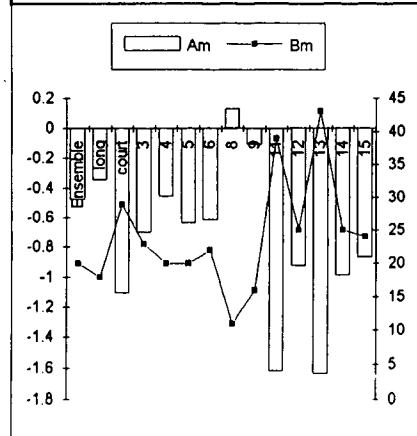
$$\text{LOG}(\text{Indice de mobilité}_{\text{classe } i}) = A + 10^{-3} \times B \times \text{Lit}_{\text{gros}}$$

Grands

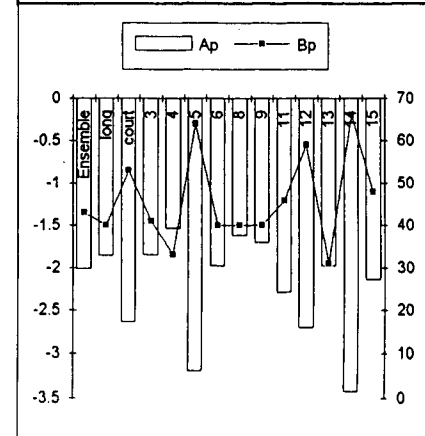
	Ag	Bg	R _g
Ensemble	1.47	-40	72
long	1.32	-38	70
court	2.20	-52	84
3	1.51	-39	88
4	0.74	-24	96
5	1.54	-37	87
6	1.49	-36	92
8	1.17	-43	93
9	1.65	-53	89
11	3.07	-68	99
12	2.67	-62	86
13	2.26	-56	98
14	1.73	-39	99
15	1.81	-45	97

**Moyens**

	Am	Bm	R _m
Ensemble	-0.48	20	69
long	-0.35	18	75
court	-1.11	29	81
3	-0.7	23	98
4	-0.46	20	97
5	-0.64	20	93
6	-0.62	22	92
8	0.13	11	72
9	-0.11	16	88
11	-1.62	39	95
12	-0.93	25	96
13	-1.64	43	100
14	-0.99	25	98
15	-0.87	24	83

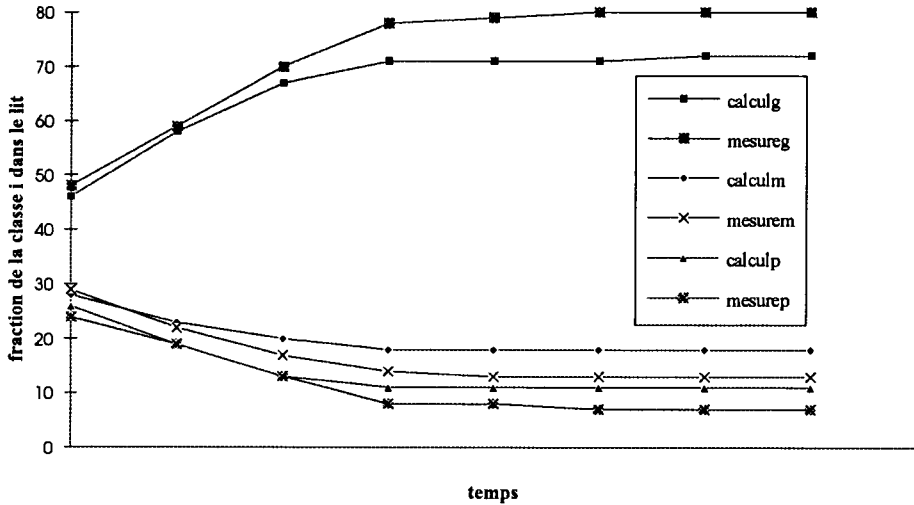
**Petits**

	Ap	Bp	R _p
Ensemble	-2.02	43	79
long	-1.87	40	82
court	-2.64	53	76
3	-1.86	41	88
4	-1.54	33	92
5	-3.2	64	77
6	-1.99	40	95
8	-1.63	40	98
9	-1.71	40	95
11	-2.29	46	80
12	-2.71	59	97
13	-1.99	31	99
14	-3.43	66	96
15	-2.15	48	98



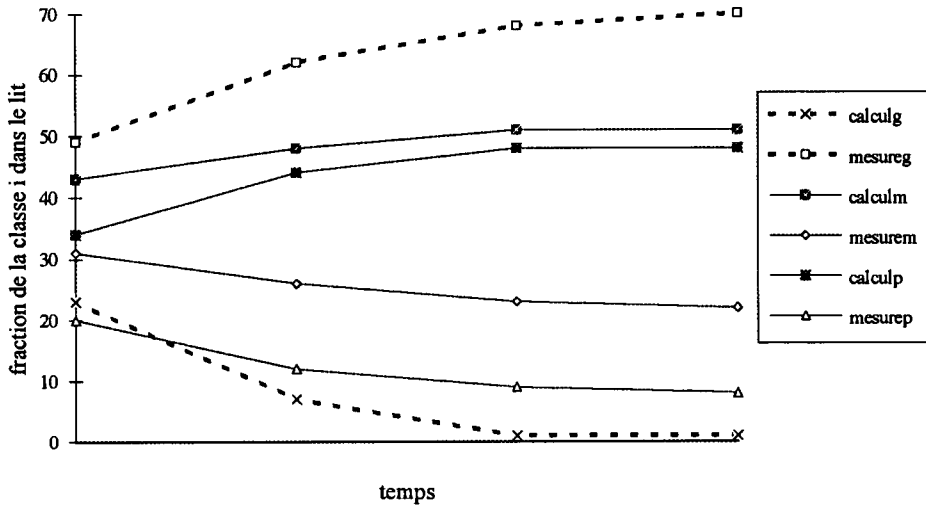
2.3.2. Résultat des simulations

Des simulations ont été réalisées en remplaçant l'indice de mobilité relative mesuré par celui ajusté en fonction de la granulométrie du lit. Dans cette étape, la probabilité de mouvement de l'ensemble des grains utilisée dans les calculs est celle qui avait été mesurée au même pas de temps. La figure suivante montre le meilleur résultat obtenu par cette méthode :



Il apparaît qu'il n'y a pas de différence fondamentale entre l'évolution calculée et celle qui a été mesurée. Cependant, en aucun cas le modèle rejoint les valeurs mesurées : l'écart est toujours croissant. Ce manque de stabilité du modèle apparaît plus nettement en considérant un essai pour lequel les résultats sont très éloignés des valeurs mesurées.

La figure suivante correspond à l'essai 12. Il apparaît que le modèle diverge totalement : il n'y a plus, en fin d'essai qu'un pour-cent d'éléments grossiers dans le lit. De même, les éléments fins et moyens voient leur effectif augmenter, sans rapport avec la réalité.



Ce résultat est *a priori* surprenant de la part d'un modèle qui prend en considération la probabilité de mouvement d'un grain : en effet, si à une étape du calcul la fraction d'une classe est surestimée, l'arrachement ses grains à l'étape suivante sera plus grand que dans la réalité, le résultat devant converger.

Cependant, en particulier pour les éléments grossiers, l'indice de mobilité relative varie dans un rapport supérieur à 100! Or, plus les éléments grossiers sont nombreux dans le lit, moins ils sont mobiles : l'effet régulateur de la probabilité est alors totalement gommé et le **modèle est intrinsèquement instable**.

De plus, la probabilité de mouvement des deux autres classes granulométriques dépend de la fraction d'éléments grossiers et agit dans le même sens : un pourcentage élevé d'éléments grossiers augmente la mobilité des éléments moyens et fins qui quittent alors le lit.

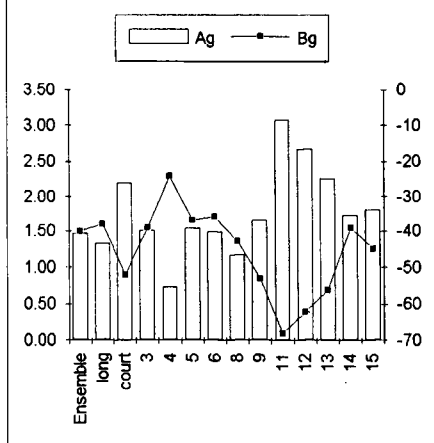
Pour diminuer cette instabilité, un second modèle a été réalisé en considérant que la mobilité de chaque classe dépend de sa fraction dans le lit. Le modèle serait alors un peu plus stable.

Figure 2

$$\text{LOG}(\text{Indice de mobilité}_{\text{classe } i}) = A + 10^{-3} \times B \times \text{Lit}_{\text{classe } i}$$

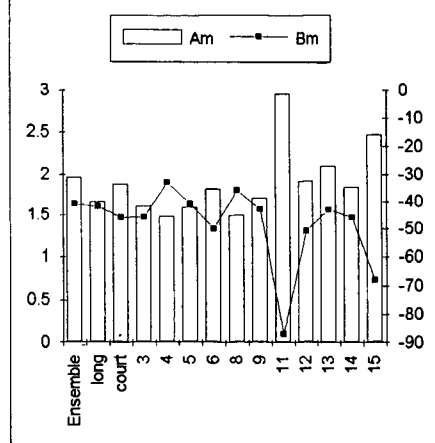
Grands

	Ag	Bg	R'g
Ensemble	1.47	-40	72
long	1.32	-38	70
court	2.20	-52	84
3	1.51	-39	88
4	0.74	-24	96
5	1.54	-37	87
6	1.49	-36	92
8	1.17	-43	93
9	1.65	-53	89
11	3.07	-68	99
12	2.67	-62	86
13	2.26	-56	98
14	1.73	-39	99
15	1.81	-45	97



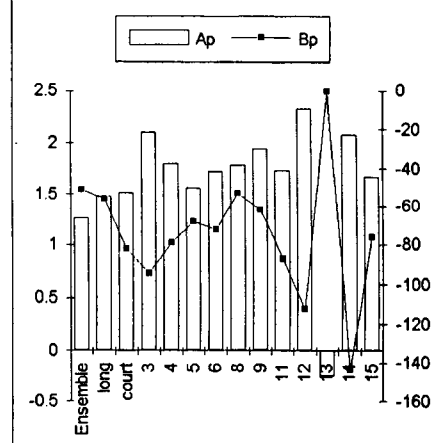
Moyens

	Am	Bm	R'm
Ensemble	1.96	-41	80
long	1.66	-42	91
court	1.88	-46	72
3	1.61	-46	96
4	1.48	-33	95
5	1.59	-41	97
6	1.82	-50	96
8	1.5	-36	72
9	1.71	-43	86
11	2.95	-87	98
12	1.92	-51	95
13	2.1	-43	100
14	1.85	-46	97
15	2.47	-68	88



Petits

	Ap	Bp	R'p
Ensemble	1.26	-51	51
long	1.48	-56	62
court	1.52	-82	51
3	2.1	-94	91
4	1.8	-79	92
5	1.56	-68	98
6	1.72	-72	94
8	1.79	-53	92
9	1.94	-62	95
11	1.74	-87	85
12	2.33	-112	95
13	-0.25	0	0
14	2.08	-143	93
15	1.67	-76	99



2.4. Explication de l'indice de mobilité relative de chaque classe granulométrique par sa fraction dans le lit

2.4.1. Ajustement

Des ajustements identiques au paragraphe précédent ont été réalisés mais en expliquant l'indice de mobilité relative en fonction de la probabilité d'éléments dans le lit. Ce sont donc les formules

$$\text{LOG}(\text{Indice de mobilité relative}_{\text{classe } i}) = A + 10^{-3} \times B (\text{fréquence dans le lit})_{\text{classe } i} \dots\dots\dots (IV-6)$$

qui ont été calées pour chacun des essais. Il n'y a pas d'évolution fondamentale de la qualité de l'ajustement par rapport au cas précédent. La figure 2 montre les différents paramètres d'ajustement dans ce cas.

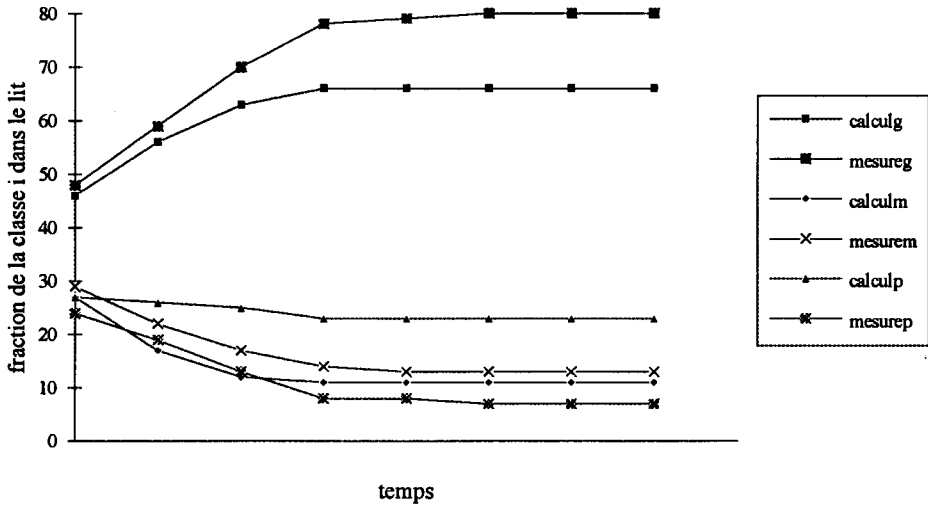
Evidemment, il n'y a aucun changement concernant les éléments grossiers. Mais les paramètres correspondant aux éléments fins et moyens sont moins variables, témoignant ainsi d'un meilleur ajustement à la réalité¹.

Cependant on remarquera que les coefficients B sont négatifs dans tous les cas. On se retrouve donc dans la même situation que précédemment : plus le matériau d'une classe i est représenté dans le lit, plus sa probabilité de mouvement normée est faible. Il est alors difficilement arraché du lit... et sa fraction y augmente.

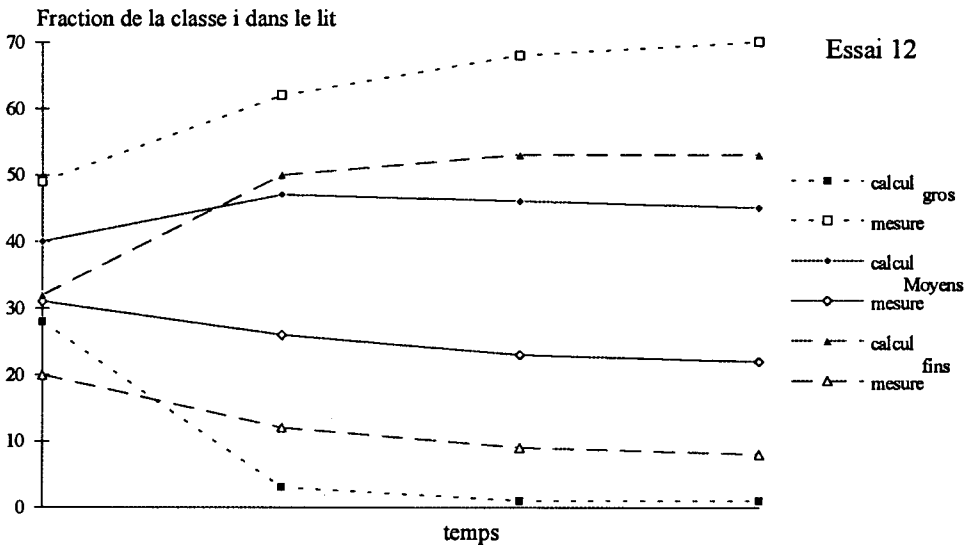
2.4.2. Résultat des simulations

Le même programme que précédemment a été utilisé pour reproduire l'évolution de la granulométrie du lit. Ainsi, la figure suivante montre l'évolution de la granulométrie du lit dans le cas de l'essai 4. Les résultats ne sont pas meilleurs qu'avec la méthode précédente.

¹ L'essai 13 présente un coefficient B nul. Cela correspond à une distribution des points en triangle: il est alors difficile d'ajuster une droite. Le coefficient B a donc été pris égal à 0 et le coefficient A correspond à la première valeur pour laquelle le transport solide est de loin le plus important. Malgré cela, la simulation de l'essai 13 donne de bons résultats.



Ainsi, il semble que cette solution ne présente pas une meilleure stabilité numérique que dans le cas d'un ajustement sur le pourcentage d'éléments grossiers. La figure suivante correspond à l'essai 12 pour lequel il y avait une divergence totale.



On retrouve là encore que les évolutions calculées se font dans le sens contraire de celles observées. Ainsi, dans ce cas aussi il n'y a pas d'amélioration en ajustant la probabilité de mouvement de chaque classe à son effectif dans le lit.

3 .MODELISATION DE LA PROBABILITE DE MOUVEMENT D 'ENSEMBLE

3.1. Objectif

Dans le paragraphe précédent, le modèle déterminait le tri granulométrique à partir de la composition granulométrique du lit (ajustement de l'indice de mobilité relative avec les fractions des classes granulométriques) et de la probabilité de mouvement globale mesurée.

Dans ce paragraphe, on va supprimer ce second paramètre en calculant directement la probabilité de mouvement de chaque classe granulométrique en fonction de la composition du lit (exprimée par la fraction d'éléments moyens dans le lit). Il ne sera alors plus nécessaire de fournir à chaque pas de temps le débit solide sortant du modèle.

En s'éloignant ainsi des observations, on court le risque d'obtenir un modèle plus instable.

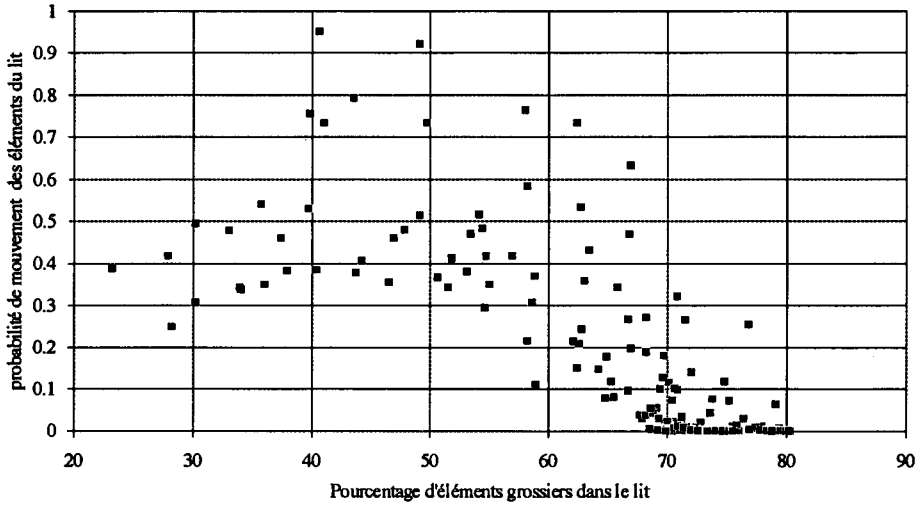
Ainsi, deux types d'ajustement à la composition du lit ont été réalisés :

- celui de l'indice de mobilité relative qui correspond au tri granulométrique (on reprend ici les résultats obtenus au paragraphe précédent),
- celui la probabilité d'ensemble qui traduit l'évolution du débit solide.

Cette décomposition permet un meilleur suivi des phénomènes car les erreurs de calcul de la probabilité d'ensemble sont sans effet sur le tri granulométrique.

3.2. Ajustement de la probabilité d'ensemble

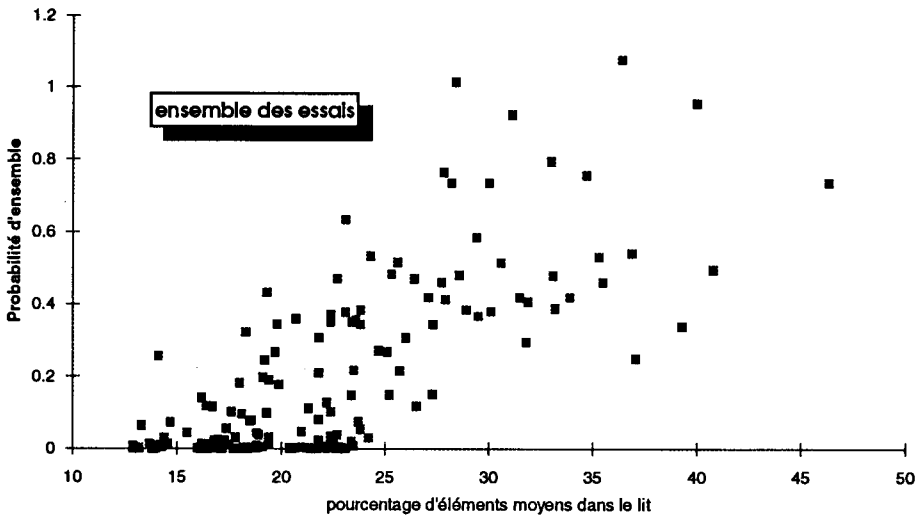
La figure suivante montre que l'évolution de la probabilité d'ensemble est non monotone en fonction de la fraction d'éléments grossiers dans le lit :



La relation la plus facile à mettre en évidence est celle qui correspond à la formule suivante :

$$\text{Probabilité d'ensemble} = A + 10^{-3} \times B \times \text{Lit}_{\text{moyens}} \dots\dots\dots (IV-7)$$

La figure suivante montre la relation entre la probabilité de mouvement d'ensemble et le pourcentage d'éléments moyens dans le lit :



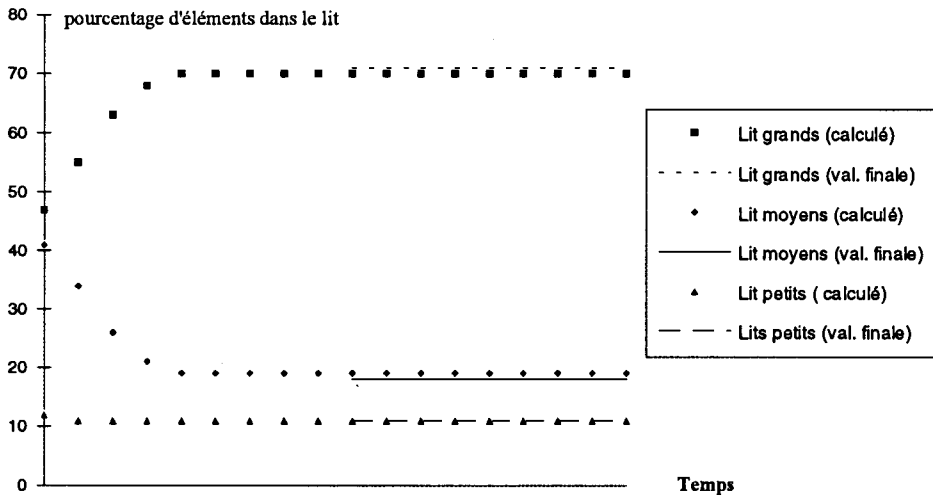
Le coefficient de corrélation est beaucoup plus réduit pour l'ajustement d'une série

d'essais que pour un essai isolé². De plus, en particulier pour les essais en canal court, il y a une forte dispersion des paramètres. Ces écarts s'expliquent par la dispersion des granulométries finales des essais.

	Essai													
	tous	longs	courts	3	4	5	6	8	9	11	12	13	14	15
A	-.40	-.40	-.58	-.58	-.43	-.59	-.43	-.72	-.58	-.33	-.86	-.41	-.74	-.61
B	24	31	29	36	33	32	30	43	35	19	41	22	32	28
R ²	48	82	45	100	98	99	96	86	91	93	88	94	98	98

3.3. Simulation

La simulation ainsi réalisée a permis de mieux cerner l'instabilité du modèle de formation du lit. En effet, en démarrant la simulation à T=10 mn avec un pas de temps d'une minute, il n'y a pas de changement notable dans l'évolution des paramètres par rapport aux simulations précédentes³. Certains résultats sont même excellents, comme dans le cas de l'essai 13 dont l'évolution est reproduite sur le graphique ci-dessous :



Cependant, dans le cas de l'essai 3, le modèle diverge totalement alors que dans les simulations précédentes, la simulation était seulement mauvaise. De même, le modèle explose pour les essais 11 et 12.

- ² Ces valeurs élevées du coefficient de corrélation s'expliquent en partie par la distribution des points: un amas de valeurs correspond à la troisième phase des essais (très faible probabilité), et seuls quelques points ont des valeurs plus élevées. Cependant, le tracé des ajustements montre qu'ils sont pertinents.
- ³ La comparaison porte sur le résultat final de l'essai et non sur l'évolution en fonction du temps. Cependant, dans le cadre d'un modèle aussi instable, la situation finale est un bon indicateur de l'évolution au cours de l'essai.

D'autre part, il est possible de mettre en évidence l'importance des conditions initiales. En effet, si on commence la simulation à $T_0=14$ mn au lieu de $T_0=10$ mn, il y a convergence dans tous les cas alors que pour $T_0=12$ mn, seul l'essai 3 pose problème. Il y a donc bien instabilité au début de la formation du lit.

Un autre enseignement de ce modèle est que le résultat dépend du pas de temps utilisé. Ainsi, seuls les essais 13 et 14 fournissent des résultats si l'on emploie un pas de temps de 0.1 mn. En effet, dans ce cas, l'impulsion de début de pavage est trop faible, et au bout de quelques pas de temps, le modèle diverge à nouveau, l'évolution se faisant alors dans le sens inverse à celui observé. Au contraire, pour un pas de temps de 1 mn, l'évolution en une itération est assez marquée pour que le modèle évolue conformément à l'observation.

Cette constatation, surprenante *a priori*, indique que l'évolution à partir de ce modèle ne peut être conforme à l'observation qu'à partir d'une granulométrie précise, ayant été utilisée lors des ajustements.

4. PERIODE DE LESSIVAGE DU LIT

Il s'agit de la phase la plus longue des essais, pendant laquelle le lit n'évolue pratiquement pas. Une première approche a montré que l'indice de mobilité relative des classes granulométriques ne change plus dans cette phase. **Seule l'évolution du débit solide est donc prise en considération ici.** Cet exposé est essentiellement basé sur les travaux de DUVERT (1993).

Les tentatives de corrélation du débit solide en fonction des paramètres hydrauliques ou granulométriques ont toutes abouti au même échec : dans cette étape, seul le débit solide varie, tous les autres paramètres étant globalement invariants.

La seconde tentative est de considérer l'évolution au cours du temps du débit solide et d'en tirer des conclusions sur les processus physiques se déroulant alors. Il est vite apparu que la longueur du canal était, de loin, le paramètre principal. Un autre paramètre est le débit liquide : plus celui-ci est important, plus la décroissance du débit solide est lente. Cependant, cette tendance est moins nette, et l'explication du débit solide en fonction du temps et de la longueur du canal aboutit à :

$$q_{S_{\text{court}}} = \frac{1}{-.322 + 0.02 \text{ temps}}$$

$$q_{S_{\text{long}}} = \frac{1}{-.427 + 0.016 \text{ temps}}$$

$$q_{S_{\text{ensemble}}} = \frac{1}{-.34 + 0.075 \text{ temps}}$$

Ces relations expliquent environ 80 % de la variance⁴. Il est possible d'unifier ces résultats en effectuant un changement de variable.

⁴ Le débit solide variant alors dans une proportion de 1 à 15, un tel coefficient de corrélation est satisfaisant.

5. CONCLUSION

Ces tentatives ont montré qu'il existe deux états stables concernant les interactions entre le lit et le transport solide :

1. La phase de fort transport solide pour lequel le lit est relativement fins et influe peu sur le transport solide.
2. L'état de lit pavé pour lequel les éléments sont plus grossiers, agencés, structurés et pour lequel le seul transport solide possible concerne le lessivage des éléments non protégés de l'écoulement par la structure.

Le passage de la phase de transport solide à celle de lessivage est progressif mais entraîne une très forte évolution du transport solide.

D'autre part, il apparaît une très forte instabilité du processus et une grande sensibilité aux conditions initiales. Ainsi, à partir d'une configuration de fort transport solide, un très faible écart dans la granulométrie du lit peu entraîner un lit dépourvu d'éléments grossiers ou, au contraire, un lit pavé de gros blocs.

Cependant, une fois les premiers éléments déposés, le processus se développe largement et se propage sur l'ensemble du lit suivant des oscillations longitudinales. Il n'y a alors aucune possibilité de retour à une situation de fort transport solide sans intervention extérieure.

Ainsi, ces simulations ont confirmé les observations réalisées sur modèle physique : le charriage torrentiel présente une forte instabilité lors d'un fort transport solide et peut basculer soit vers le charriage hyperconcentré soit vers le charriage ordinaire, qui correspond à un débit solide nettement réduit et à une granulométrie grossière du lit.

D'autre part, il a montré que la simulation des ces phénomènes par un modèle numérique nécessitait la prise en compte des équations correspondant aux phénomènes régulateurs car, sinon le modèle numérique est beaucoup trop instable pour pouvoir être prédictif.

Le chapitre 8 détaille les différentes étapes à accomplir pour obtenir un modèle généralisable. Il est clair qu'une telle démarche nécessite un travail systématique sur modèle réduit, sans rapport avec celui qui a été réalisé ici. Il s'agit donc d'un travail de grande ampleur dont cette annexe n'a permis que de mettre en évidence les difficultés.

LOUIS - JEAN
avenue d'Embrun, 05003 GAP cedex
Tél. : 92.53.17.00
Dépôt légal : 886 — Novembre 1994
Imprimé en France

