



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



**CENTRE NATIONAL
DU MACHINISME AGRICOLE
DU GÉNIE RURAL
DES EAUX ET DES FORÊTS**

GROUPEMENT DE GRENOBLE
2, rue de la Papeterie, BP 76
38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex
Tél. : 76 76 27 27 - Télex : 980 679 F
Télécopie : 76 51 38 03

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 édite 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 POCHAT (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,

Revois 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 \Leftrightarrow 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'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
7.6. 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.