

Programme ARAI 3 Érosion, transport solide et dynamique torrentielle des rivières de Polynésie française

Rapport final
BRGM/RP-60251-FR
septembre 2011

Programme ARAI 3 Érosion, transport solide et dynamique torrentielle des rivières de Polynésie française

Rapport final

BRGM/RP-60251-FR

septembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010

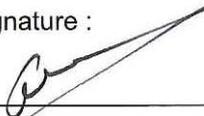
Philippe Stollsteiner

Vérificateur :

Nom : O. Sedan

Date : 16/01/12

Signature :



Approbateur :

Nom : H. Modaressi

Date : 16/01/2012

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots-clés : Rivières, Alluvions, Transport solide, Matières en suspension, Hydrologie, géomorphologie, Crues, Polynésie Française, Tahiti.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Stollsteiner P. (2011) – Programme ARAI 3. Érosion, transport solide et dynamique torrentielle des rivières de Polynésie française. Rapport final. BRGM/RP-60251-FR, 140 p., 52 fig., 13 tab., 6 ann.

Synthèse

En raison de leur climat tropical océanique, les îles montagneuses de Polynésie Française, notamment Tahiti, ont une pluviométrie très élevée (pouvant atteindre, voire dépasser, 4 m/an) et des précipitations très importantes (par leur intensité et par le cumul de pluie par événement) qui sont à l'origine de crises érosives des ravines.

Beaucoup de têtes de ravines se situent dans la tranche d'altitude où les précipitations sont les plus abondantes. De plus, elles correspondent à des zones d'érosion active par glissement, ravinement, écroulement, etc. dues entre autres au pourcentage très élevé des pentes. En revanche, dans la partie aval, c'est-à-dire au débouché des principaux cours d'eau, l'occupation humaine est l'un des facteurs prépondérants de la transformation des paysages. Le littoral, caractérisé par des zones relativement plates, est le lieu privilégié du développement urbain. L'habitat et les activités économiques sont donc majoritairement localisés à proximité des zones de transitions entre plaine et montagne, particulièrement vulnérables aux risques d'inondations. Par ailleurs, ces cours d'eau (qui ont des pentes relativement fortes) peuvent entraîner un charriage de matériaux important, impactant les écoulements et influençant donc l'aléa inondation. Ils transportent également des matériaux fins en suspension jusqu'au lagon, apport terrigène particulièrement néfaste pour la santé des coraux.

Le présent rapport définit le **cadre scientifique général du domaine du transport solide**, de la géomorphologie des rivières et de l'hydraulique torrentielle. Il précise le fonctionnement qualitatif des différents types de cours d'eau, et liste les moyens et les différentes formules permettant une évaluation quantitative de ce transport. À cette partie théorique s'ajoute un **état des lieux sur les données, les connaissances locales et les réseaux de mesures en Polynésie française** sur cette problématique. Ces données, très restreintes, montrent toutefois l'importance, sur le territoire polynésien, du couvert végétal et des facteurs anthropiques dans la production en amont de sédiments susceptibles d'être transportés.

Tout cours d'eau, quelle que soit son échelle, s'organise toujours de l'amont vers l'aval, selon le schéma habituel : érosion – transport – sédimentation. Ces trois phases vont prendre plus ou moins d'importance en fonction des facteurs décrits précédemment. Elles correspondent approximativement :

- au bassin de réception, à l'amont, plus ou moins développé selon les ravines et dont la tête présente des morphologies diverses ;
- au canal d'écoulement des ravines, dans la partie intermédiaire, où les eaux sont canalisées entre deux gorges et des rives bien délimitées, avec une succession éventuelle de seuils et un cours quasi-rectiligne, en général sans trace de méandres ;
- aux débouchés dans les plaines côtières, où il existe peu de cônes de déjection ;
- et enfin l'exutoire en mer qui peut ou non déboucher sur un lagon.

Le transport solide des rivières est conditionné par la fourniture en amont de sédiments susceptibles d'être transportés. Certaines îles de Polynésie française, dont Tahiti, sont très exposées à cette problématique puisqu'elles sont à la fois concernées par des rivières torrentielles susceptibles de concentrer des débits exceptionnels, et soumises à une forte érosion due à la conjonction de leur relief, du climat et du développement urbain. En effet, la production est favorisée par :

- les zones de stockage situées dans la partie haute des bassins versants dues par exemple à des glissements de terrain ;
- l'érosion des versants naturels ;
- le ruissellement sur des surfaces non végétalisées, notamment les zones de déforestation, et surtout les terrassements et les surfaces imperméabilisées ;
- l'érosion des berges du cours d'eau.

Ce phénomène peut donc se décomposer en deux parties distinctes :

- la fourniture de matériaux ;
- le transport vers ou jusqu'à la mer de ces matériaux.

La présence d'une plaine côtière et d'une rupture quasi généralisée de la pente des cours d'eau en partie amont des zones urbanisées favorise, pour certaines d'entre elles, le dépôt (ou atterrissement) des sédiments les plus grossiers (charriage). Ceci crée des surélévations locales des lits des cours d'eau susceptibles de favoriser les inondations, sans toutefois empêcher les sédiments plus fins d'arriver jusqu'au lagon, où ils constituent une source significative de pollution.

Afin de tenter de traiter cette problématique, il apparaît donc nécessaire de :

- cerner les principales zones contributrices à l'érosion et aux glissements de terrain ;
- quantifier les apports solides potentiels de ces zones ;
- quantifier les capacités de transports, tant en charriage qu'en suspension, des principaux cours d'eau situés en amont des principaux enjeux (urbanisations et lagons).

Les formules ou modèles d'estimation des apports (par exemple le modèle USLE dit « de Wischmeier ») des débits liquides (crues) et des transports solides (formules empiriques) existants, ont été développés pour des climats et reliefs très différents et ne peuvent donc être appliqués, dans l'état, au contexte polynésien. Il apparaît ainsi fortement souhaitable de confronter ces modèles avec des données locales, pour vérifier dans un premier temps leur pertinence, et dans l'affirmative, les caler avec des données spécifiques.

Les opérations qui pourraient être envisagées en Polynésie française sont :

- de localiser les zones naturelles ou anthropiques préférentielles d'érosion et/ou de glissement de terrain ;

- de maintenir voire développer les stations hydrométriques permettant la connaissance des débits liquides ;
- d'équiper les principales stations hydrométriques, situées en amont des lagons sur la plaine côtière de préleveurs automatiques, ou pour le moins assurer la réalisation de prélèvements, afin de préciser les volumes de sédiments en suspension susceptibles d'atteindre le lagon ;
- envisager la mise en place de moyen de mesures ou d'évaluation des sédiments charriés en installant des équipements tels que ceux listés dans ce rapport ou par des campagnes topographiques régulières. Il s'agit ici de localiser les zones de dépôts et, s'il y a lieu, de les entretenir par des opérations de recalibrage ou de dragage ;
- sur la base de ces nouvelles connaissances, de choisir, suivant les îles, les formules de calcul les plus adaptées.

Le développement de ces connaissances devrait permettre de définir des mesures adéquates susceptibles de réduire les deux enjeux les plus significatifs en Polynésie : le risque d'inondation et le risque de pollution des lagons.

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	17
2. LE TRANSPORT SOLIDE ET LA DYNAMIQUE TORRENTIELLE : PRINCIPES GÉNÉRAUX.....	19
2.1. TRANSPORT SOLIDE ET ÉQUILIBRE MORPHOLOGIQUE	19
2.1.1. Les mécanismes du transport	19
2.1.2. Classification des matériaux transportés	20
2.1.3. Les équilibres fondamentaux	21
2.1.4. La dynamique ordinaire et les crises.....	22
2.1.5. Paramètres clés régissant le phénomène de transport solide.....	24
2.2. CLARIFICATION DU DOMAINE D'ÉTUDE DE L'HYDRAULIQUE TORRENTIELLE	24
2.2.1. Délimitation quantitative de l'hydraulique torrentielle par rapport à l'hydraulique fluviale	24
2.2.2. Champ de l'hydraulique torrentielle.....	24
2.2.3. Les laves torrentielles	26
2.2.4. Les écoulements hyperconcentrés	27
2.3. SYNTHÈSE	28
3. LES ENJEUX DE LA GESTION DU TRANSPORT SOLIDE	29
3.1. PRÉLIMINAIRES : PRÉSENTATION DES CLASSIFICATIONS FLUVIALES ET APPLICATION À TAHITI.....	29
3.1.1. Caractérisation des rivières par leur morphologie	29
3.1.2. Caractérisation des rivières par leur régime de crue	32
3.2. INTERACTION ENTRE TRANSPORT SOLIDE ET MORPHOLOGIE D'UN COURS D'EAU.....	33
3.2.1. Rappel : mécanismes élémentaires d'ajustement du profil en long.....	33
3.2.2. Variations de pente le long d'un cours d'eau	33
3.2.3. Interaction entre transport solide et morphologie d'un cours d'eau	35
3.3. IMPACTS DU TRANSPORT SOLIDE SUR L'HYDROSYSTÈME	36
3.3.1. Interactions avec la nappe	36
3.3.2. Interactions avec le milieu naturel aquatique	37
3.3.3. Interactions avec les milieux naturels riverains.....	37
3.3.4. Interactions avec les autres usages des cours d'eau	37

3.3.5. Interactions avec le lagon	37
3.4. ARGUMENTS POUR LA GESTION DU TRANSPORT SOLIDE	37
4. ÉROSION DES SOLS ET APPORTS DE MATÉRIAUX AUX RIVIÈRES À TAHITI	39
4.1. LES PHÉNOMÈNES D'ÉROSION DANS LES BASSINS VERSANTS MONTAGNEUX	39
4.1.1. Quelques caractéristiques des bassins versants montagneux	39
4.1.2. Typologie des phénomènes d'érosion	40
4.2. L'ORIGINE DES MATÉRIAUX DANS LES RIVIÈRES.....	41
4.3. LES FACTEURS DE L'ÉROSION DES VERSANTS À TAHITI	42
4.3.1. Généralités.....	42
4.3.2. Facteurs climatiques et couverture végétale	43
4.3.3. Facteurs géologiques et/ou pédologiques	44
4.3.4. Facteurs géomorphologiques	45
4.3.5. Facteurs anthropiques	45
4.4. LES DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE TEMPS DES PHÉNOMÈNES D'ÉROSION	46
4.5. QUANTIFICATION DE L'ÉROSION DES SOLS À TAHITI	47
4.6. SYNTHÈSE.....	48
5. COMMENT QUANTIFIER LE TRANSPORT SOLIDE D'UNE RIVIÈRE TORRENTIELLE	51
5.1. LA PRODUCTION DE MATÉRIAUX ÉRODÉS.....	51
5.1.1. L'estimation des apports des versants	51
5.1.2. L'estimation de la production de sédiments	52
5.2. L'ESTIMATION DES DÉBITS LIQUIDES.....	55
5.3. L'ESTIMATION DES DÉBITS SOLIDES.....	55
5.3.1. Seuils de début d'entraînement et capacité maximale de transport.....	55
5.3.2. La granulométrie des lits des cours d'eau	55
5.4. LES TECHNIQUES DE MESURE DE LA CHARGE DES RIVIÈRES.....	59
5.4.1. Méthodes et outils de suivi des volumes charriés : le diagnostic géomorphologique comme méthode d'analyse.....	61
5.4.2. Les outils de suivi	61
6. PRÉCONISATIONS OPÉRATIONNELLES EN POLYNÉSIE FRANÇAISE.....	67
6.1. AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES CONCERNANT LE TRANSPORT SOLIDE	67

6.2. RISQUE LIÉ AU RÉGIME TORRENTIEL DES RIVIÈRES.....	68
6.2.1. Risque de débordement sur les cônes de déjection.....	68
6.2.2. Les stratégies de protection torrentielle.....	68
6.2.3. Protection des aménagements existants sur les cours d'eau.....	70
6.3. PRÉCONISATION EN TERMES D'AMÉNAGEMENTS OU D'INTERVENTIONS ANTHROPIQUES SUR LE TRANSPORT SOLIDE.....	71
6.3.1. Préconisation en termes d'extraction de matériaux.....	71
6.3.2. Préconisation lors d'opérations de terrassement.....	72
7. CONCLUSIONS.....	73
8. BIBLIOGRAPHIE.....	75

Liste des figures

Figure 1 - Les mécanismes du transport solide (Agence de l'eau RMC, 1999).	19
Figure 2 - Le mécanisme de pavage (Agence de l'eau RMC, 1999).	20
Figure 3 - Schéma conceptuel illustrant les relations entre les différents paramètres qui contrôlent l'évolution du lit d'un torrent.	21
Figure 4 - Efficacité du transport solide par gamme de débit - débit de début d'entraînement (Agence de l'eau RMC, 1999).	23
Figure 5 - Effet du pavage sur le débit de début d'entraînement.	23
Figure 6 - Phénomènes lents et rapides en hydraulique et mouvements de terrain (Meunier, 1991).	25
Figure 7 - Bouffée de lave torrentielle (Meunier, 1991).	26
Figure 8 - Lave torrentielle - profil en travers du lit inférieur (Meunier, 1991).	27
Figure 9 - Représentation des divers types de cours d'eau et des modes de transports associés en fonction de la pente et de la concentration volumique (Besson et Meunier, 1995).	30
Figure 10 - Différents types morphologiques en fonction de la pente.	30
Figure 11 - Profil longitudinal de quelques-unes des principales rivières de Tahiti ([1] J. SERVANT, 1974).	31
Figure 12 - Système torrentiel type.	31
Figure 13 - Caractéristiques hydrologiques des principales rivières de Tahiti (Atlas ORSTOM, 1993).	32
Figure 14 - Mécanisme d'ajustement de la pente.	33

Figure 15 - Évolution d'un cours d'amont vers l'aval et/ou au cours du temps.	34
Figure 16 - Exemple de lit en tresses : Taharuu.	35
Figure 17 - Exemple de lit en méandres : Titaavirii.	36
Figure 18 - Évolution permanente des méandres.	36
Figure 19 - Les processus d'érosion sur les versants montagneux (Brochot et al., 1998).	41
Figure 20 - Représentation du fonctionnement des bassins versants torrentiels en crue (Brochot <i>et al.</i> , 1998).	41
Figure 21 - Glissement dans le bassin amont de la Papenoo (10/2003).	42
Figure 22 - Efficacité érosive des bioclimats calculée sur la base de la turbidité des cours d'eau.	43
Figure 23 - Carte de la végétation des îles de Tahiti et Moorea (Atlas ORSTOM 1993).	44
Figure 24 - Carte géomorphologique des îles de Tahiti et Moorea (Atlas ORSTOM, 1993).	45
Figure 25 - Exemple de contraintes d'aménagements (terrassements) pouvant influencer sur l'érosion à proximité de Papeete (Atlas ORSTOM 1993).	46
Figure 26 - Évaluation de l'érosion des sols de Tahiti à l'aide d'un modèle de Wischmeier (Fengyin Ye <i>et al.</i> , 2009).	48
Figure 27 - Exemple de structure arborescente pour la représentation d'un bassin versant dans le modèle ETC du Cemagref (Brochot, 1998).	54
Figure 28 - Tableau de comptage et taux d'occupation surfacique des classes d'éléments (Meunier <i>et al.</i> , 1987).	57
Figure 29 - Exemple de diagramme de synthèse du diagnostic géomorphologique sur la rivière des Pluies (BRGM, 2003).	62
Figure 30 - Exemple de tracé d'évolution du profil en long et vue aérienne retraçant l'évolution de la localisation du lit mineur et des berges au droit d'un tronçon spécifique.	63
Figure 31 - Exemple d'évaluations des dépôts et affouillements réalisées entre deux dates au moyen de levés topographiques.	64
Figure 32 - La contrainte de cisaillement (Meunier, 1991).	87
Figure 33 - Courbe de Shields donnant le seuil de charriage (Meunier, 1991).	89
Figure 34 - Contrainte de cisaillement en écoulement torrentiel.	91
Figure 35 - Organisation du module de transport solide dans ETC (Brochot et al., 1998).	102
Figure 36 - Les perturbations induites par un barrage (Agence de l'eau RMC, 1999).	113
Figure 37 - Mécanisme de perturbation - les restitutions d'eau claire (Agence de l'eau RMC, 1999).	114
Figure 38 - Mécanismes de perturbation – les extractions en lit mineur (Agence de l'eau RMC, 1999).	115
Figure 39 - Impact de la coupure d'un méandre.	116
Figure 40 - Mécanisme de perturbation – effet d'un endiguement (Agence de l'eau RMC, 1999).	116

Figure 41 - Schématisation des processus de formation des crues (J.-P. Jordan, 1994).....	120
Figure 42 - Exemple de préleveur automatique.....	129
Figure 43 - Schéma d'un piège à sédiments de type « net-frame » (Bunte, 1998).....	130
Figure 44 - Exemple d'échantillonneur Helley-Smith (US BL-84 bedload sample utilisé dans le cadre du Federal Interagency Sedimentation Project).	131
Figure 45 - Schéma d'un échantillonneur Helley-Smith (d'après Helley and Smith, 1971).....	131
Figure 46 - Exemple d'échantillonneur dit « Toutle » (proposé par la Rickly Hydrological Company), fonctionnant suivant le même principe que les échantillonneurs Helley-Smith.	132
Figure 47 - Schéma (en coupe transverse à la rivière) d'une installation de mesure de la charge de fond par échantillonneur automatique à fente, d'après Garcia <i>et al.</i> (2000).	133
Figure 48 - Schéma des deux dispositifs possibles pour la mesure de la charge d'un échantillonneur automatique de sédiments, d'après Lewis (1991).	134
Figure 49 - Face inférieure du détecteur d'impacts de Carling <i>et al.</i> (2002), avec le compteur d'impacts fixé à la plaque recevant les impacts.	137
Figure 50 - Schéma illustrant l'utilisation de chaînes d'affouillement : le mouvement des sédiments du lit pendant le transport de la charge de fond pousse la chaîne horizontalement sur l'épaisseur de la charge mobile.	138
Figure 51 - Schéma d'un dispositif de mesure d'affouillement de type « perle glissante ».....	139
Figure 52 - Détecteur d'affouillement par mesure de pression.....	140

Liste des tableaux

Tableau 1 - Description de méthodes de détermination de la courbe granulométrique. Avantages et inconvénients.	58
Tableau 2 - Résumé des principales caractéristiques des méthodes de mesure de charge sédimentaire de fond.	60
Tableau 3 - Récapitulatif des stratégies de défense contre les écoulements torrentiels.	70
Tableau 4 - Comparaison de la contrainte de cisaillement, de la viscosité et de la turbulence (Meunier, 1991)	88

Liste des annexes

Annexe 1 : Concepts de base utilisés pour caractériser le transport solide en hydraulique fluviale et introduction à l'hydraulique torrentielle.....	85
Annexe 2 : Variables clés régissant le transport solide.....	95
Annexe 3 : État de l'art sur la modélisation du transport solide	105
Annexe 4 : Influence possible des aménagements anthropiques sur le transport solide	111
Annexe 5 : Estimation des débits liquides en régime torrentiel.....	117
Annexe 6 : Technique de mesures de la charge des rivières	127

Liste des symboles utilisés

Ql (ou Q)	M3/S	Débit liquide (Q s'il n'y a pas d'ambiguïté).
Qs	M3/s	Débit solide (souvent exprimé aussi en kg/s).
Φ		Débit solide adimensionnel.
S	m ²	Surface occupée par l'écoulement.
hl	m	Hauteur fictive d'écoulement due au débit liquide.
hs	m	Hauteur fictive d'écoulement due au débit solide.
h	m	Tirant d'eau ou de mélange (hauteur totale de l'écoulement hm = hs + hl).
P	m	Périmètre mouillé.
R	m	Rayon hydraulique ($R = \frac{S}{P}$)
y	m	Ordonnée d'un point de l'écoulement perpendiculairement au profil en long.
\bar{U}	m/s	Vitesse moyenne de l'écoulement ($\bar{U} = \frac{Q}{S}$)
Usa	m/s	Vitesse à la surface de l'écoulement
Us		Vitesse du sédiment solide.
u(y)	m/s	Vitesse de l'écoulement à la hauteur y
u*	m/s	Vitesse de frottement ($u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$)
I	m/m	Pente du profil en long.
Ks	mm	Hauteur de la rugosité du lit (rugosité de peau).
g	m/s ²	Accélération de la pesanteur.
ρ_l (ou ρ)	kg/m ³	Masse volumique de l'eau (ρ quand il n'y a pas d'ambiguïté).
ρ_s	kg/m ³	Masse volumique du matériau solide.
ρ_m	kg/m ³	Masse volumique du mélange eau + solide
p	Pa	Pression du fluide.
$\tau(y)$	Pa(N/m ²)	Contrainte de cisaillement à la hauteur y.
τ^*		Contrainte de cisaillement adimensionnelle.
τ_0	Pa	Contrainte de cisaillement au fond.
τ_c	Pa	1/ Seuil critique de la contrainte de cisaillement autorisant l'arrachement d'un grain. 2/ Rigidité initiale de la loi de Bingham ou de Casson.
l(y)	m	Longueur de mélange (théorie de la turbulence).
k	-	Dépend du contexte : 1/ Constante de Von Karman l(y) = k.y 2/ Consistance de la loi d'Ostwald.
n	-	Indice d'écoulement de la loi d'Ostwald.
μ	poiseuille (N.S/m ²)	Viscosité dynamique.
ν	m ² /s	Viscosité cinématique.
μ_p	poiseuille	Viscosité de Bingham ou viscosité plastique.
μ_a	poiseuille	Viscosité apparente.
Re	-	Nombre de Reynolds ($Re = \frac{\rho \bar{U} h}{\mu}$ pour un fluide newtonien).
Re*	*	Nombre de Reynolds universel.
Re*	*	Nombre de Reynolds de la rugosité.
Rw	-	Nombre de Reynolds de chute en eau calme.
X, Y, Z, W		Nombres adimensionnels utilisés en transport solide fluvial (voir § 2.5).
d	m	Diamètre représentatif du matériau solide.
0, d50, d90	m	Diamètre du matériau solide tel que 30 %, 50 % ou 90 % en poids du matériau solide soit de taille inférieure.
Cx	-	Coefficient de traînée.
C*	-	Compacité.
c	-	Concentration (Rapport $\frac{Qs}{Ql}$)
Cv	-	Concentration volumique de flux ($\frac{Qs}{Qs + Ql}$)
Cp	-	Concentration massique.
i	-	Indice des vides.
λ	-	Concentration linéaire.
θ	-	Teneur en eau.
C _{mat}	kg/m ³	Concentration des matières en suspension.
N et G ²	-	Nombres adimensionnels de Bagnold.
ai	-	Paramètre de calage de la loi de Bagnold.
φ	-	Angle de frottement interne statique.
α	-	Angle de frottement interne dynamique ou
		Rapport $\frac{\tau_c}{\tau_0}$ dans l'utilisation de la loi de Bingham.

1. Introduction

La Polynésie française est soumise à un climat tropical humide se traduisant par des précipitations moyennes annuelles pouvant localement atteindre 4 000 mm. Depuis les zones escarpées (naturelles ou aménagées), ce régime est responsable de transport solide pouvant avoir des conséquences importantes en aval.

En effet, non seulement les cours d'eaux qui ont des pentes relativement fortes peuvent entraîner un charriage de matériaux important, impactant notamment les écoulements et influençant donc l'aléa inondation, mais ceux-ci transportent, en suspension, les matériaux fins jusqu'au lagon, apport terrigène particulièrement néfaste pour la santé des coraux.

Selon la morphologie de la rivière, on peut ainsi distinguer deux modes de transports solides, le transport par suspension, qui concerne plus particulièrement les matériaux fins, et le charriage.

Le présent rapport, qui définit le cadre scientifique général du domaine du transport solide et de l'hydraulique torrentielle, s'efforce de dresser un inventaire des dispositifs de mesures et des données existants. Cette bibliographie généraliste est complétée par une synthèse des connaissances et des études réalisées dans le domaine du transport solide en général. Il reprend une grande partie du rapport BRGM réalisé en juin 2004 dans le cadre du projet DYNTOR sur les rivières de la Réunion.

L'équilibre sédimentologique d'un cours d'eau, et donc sa morphologie, est modifié par les phénomènes naturels (glissements de terrain, éboulis) et/ou par l'action de l'homme (extractions de matériaux dans le lit, aménagements de protection contre les inondations, infrastructures de transport...). L'étude du fonctionnement des rivières de plaine en période de crue est une discipline technique pointue du domaine de l'hydraulique fluviale, dont les bases théoriques sont tirées de la mécanique des fluides. En milieu montagneux, les phénomènes de crue torrentielle mettent en jeu des mécanismes physiques spécifiques, dans des conditions climatiques et topographiques particulières. Pour marquer la distinction avec l'hydraulique fluviale, on parle pour l'étude des phénomènes de crues et de transport solide en milieu montagneux d'hydraulique torrentielle. Cette discipline est en plein développement depuis une trentaine d'années. Elle est née avec les aménagements hydroélectriques sur les rivières de montagne et trouve des applications techniques nombreuses en rapport avec les activités anthropiques dans ou sur les cours d'eau.

Les efforts de recherche sur le transport solide ont pour objectif de comprendre les phénomènes physiques afin d'améliorer les modalités de gestion des Domaines Publics Fluviaux en milieu montagneux qui sont des environnements sensibles. Les cours d'eau, et particulièrement les torrents, sont des environnements évolutifs fragiles. Mieux gérer les activités anthropiques sur ou à proximité des cours d'eau va dans le sens de la préservation des systèmes aquatiques, objectif mis en exergue par la Loi

sur l'Eau de janvier 1992 et dans les SDAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux).

Cette synthèse introduit dans un premier temps les bases de l'hydraulique torrentielle et du transport solide. Nous nous attachons ensuite à caractériser l'impact du transport solide sur la morphologie des cours d'eau et des hydrosystèmes, conduisant à identifier les enjeux de cette problématique. Un chapitre spécifique aborde l'érosion en Polynésie et l'état des lieux de l'existant en termes de connaissance, avant de présenter les moyens et méthodes envisageables pour améliorer la connaissance du transport solide des rivières. Enfin, nous terminons sur les préconisations envisageables en Polynésie pour tenir compte du transport solide, d'après la spécificité locale et l'existant.

2. Le transport solide et la dynamique torrentielle : principes généraux

2.1. TRANSPORT SOLIDE ET ÉQUILIBRE MORPHOLOGIQUE

2.1.1. Les mécanismes du transport

On peut caractériser le transport des sédiments, qui s'effectue essentiellement en hautes eaux, par le mode de transport et par l'effet du transport. Le transport des matériaux dans un cours d'eau peut s'effectuer, si l'on ne tient pas compte du transport par dilution, de deux manières : par charriage ou par suspension (Figure 1) :

- le **charriage** est un transport sur le fond du lit qui correspond, en général, aux alluvions les plus grossières, des sables jusqu'aux blocs ;
- la **suspension** est le transport « entre deux eaux » qui concerne les particules fines (argiles, limons, parfois sables dans les rivières les plus rapides).

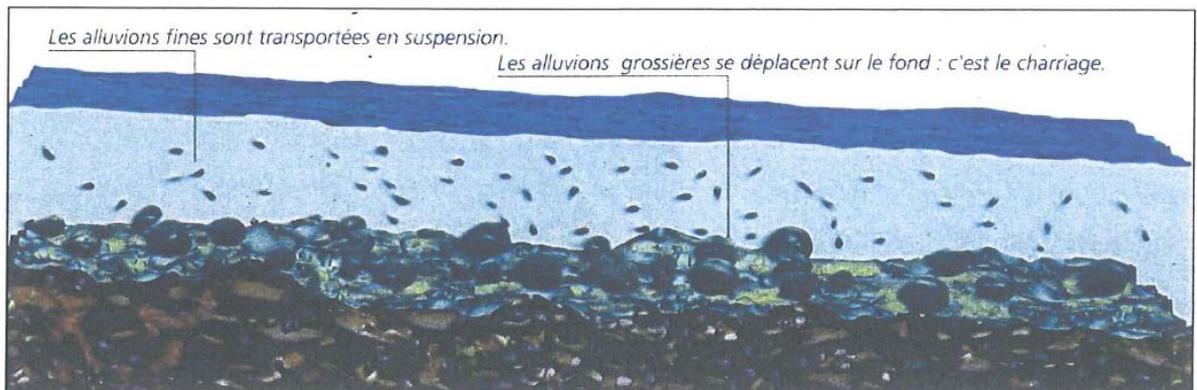


Figure 1 - Les mécanismes du transport solide (Agence de l'eau RMC, 1999).

Le terme de charriage torrentiel traduit les processus de transport de sédiments plus ou moins grossiers sur le fond des torrents, alternativement sous forme de charriage hyperconcentré et de charriage ordinaire. On parle de charriage ordinaire lorsque les concentrations volumiques sont de l'ordre de 5 % (c'est le cas général en fin de crue lorsque le lit est pavé et qu'il possède une grande résistance à l'érosion, ou lorsque la pente est inférieure à 1 %) et de charriage hyperconcentré au-delà de 5 % (Bertrand *et al.*, 2001). Lors des crues, la concentration volumique du matériau solide est de l'ordre de 5 à 30 %.

Il n'y a pas de différence de nature entre le charriage ordinaire et le charriage hyperconcentré, ni de transition brutale. La différence principale est d'ordre phénoménologique et se base sur la distinction entre les écoulements que nous détaillerons au paragraphe 2.2.

Toutefois, lorsque que l'on passe du premier type au second, l'ensemble du spectre granulométrique du lit est progressivement mobilisé et la couche de charriage s'épaissit.

2.1.2. Classification des matériaux transportés

Les matériaux transportés par charriage ou en suspension sont caractérisés par deux paramètres :

- **la densité du matériau** : cette densité varie relativement peu d'un matériau à l'autre : elle est en général comprise entre 2,5 et 2,8 ;
- **la granulométrie du matériau** qui est le paramètre essentiel : la classification en usage en hydraulique fluviale comporte six classes :
 - les argiles, inférieures à 5 µm,
 - les silts et limons de 5 à 50 µm,
 - les sables de 0,05 à 2 mm,
 - les graviers de 2 à 20 mm,
 - les galets de 20 à 300 mm,
 - les blocs au-dessus de 300 mm.

La composition des alluvions transportées varie également avec le débit, les plus fines étant déplacées plus facilement. Cette relation est rendue complexe par les phénomènes de masquage : les particules de petite taille sont protégées par les particules plus grosses qui les recouvrent (phénomène de pavage illustré Figure 2). La granulométrie d'un tronçon n'est pas forcément représentative de la morphologie de la rivière en ce point, car il a pu s'opérer un tri granulométrique au cours d'épisodes de crues précédents.

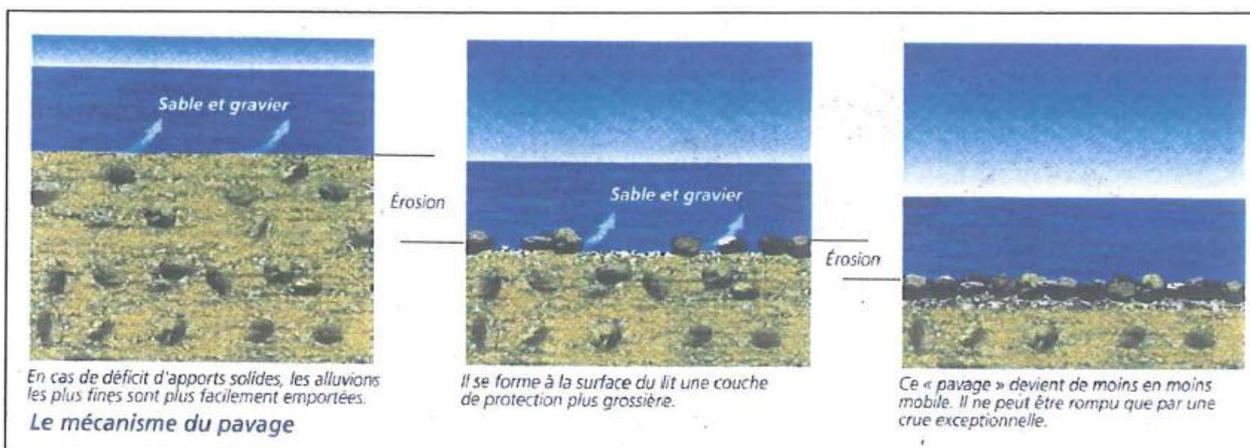


Figure 2 - Le mécanisme de pavage (Agence de l'eau RMC, 1999).

Le pavage au sens strict résulte d'un tri granulométrique. Il est provoqué le plus souvent par un déficit de l'apport solide par rapport à la potentialité de transport de la

rivière. En effet, lorsque le transport est faible, les matériaux grossiers sont moins déplacés que les matériaux les plus fins. En fin de crue par exemple, le débit diminuant, il se forme une couche d'éléments grossiers qui limite le transport solide en protégeant les matériaux les plus fins.

On comprend que la granulométrie est un des paramètres influençant le transport solide dans les rivières. Celle-ci est pour autant d'un accès limité, car si sa distribution à l'échelle d'une rivière est logique (la granulométrie décroît quand on s'approche de la mer), elle peut avoir localement des évolutions opposées qui sont dues à des phénomènes de tri inhérents aux mécanismes de transport solide en période de crue.

2.1.3. Les équilibres fondamentaux

Sur un cours d'eau non perturbé par des activités anthropiques, ayant librement façonné son lit, **un équilibre moyen** s'installe entre le débit solide, le débit liquide, la taille des matériaux et la pente. Le débit liquide, le débit solide et la taille des matériaux sont déterminés par la géographie du bassin versant.

C'est donc la pente qui est le principal « paramètre de réglage » utilisé par le cours d'eau pour ajuster sa capacité de transport solide aux apports effectifs. Les autres caractéristiques géométriques du lit peuvent également jouer, mais leur rôle est secondaire. Elles sont le plus souvent une résultante des conditions du transport solide plus qu'un paramètre explicatif, sauf lorsque la largeur du lit est artificiellement réduite.

Sur un cours d'eau perturbé, **un équilibre dynamique** s'établit donc entre les quatre variables fondamentales que sont la pente, les débits solides et liquides ainsi que la granulométrie, comme l'illustre le graphique conceptuel de Lane (1995), présenté Figure 3.

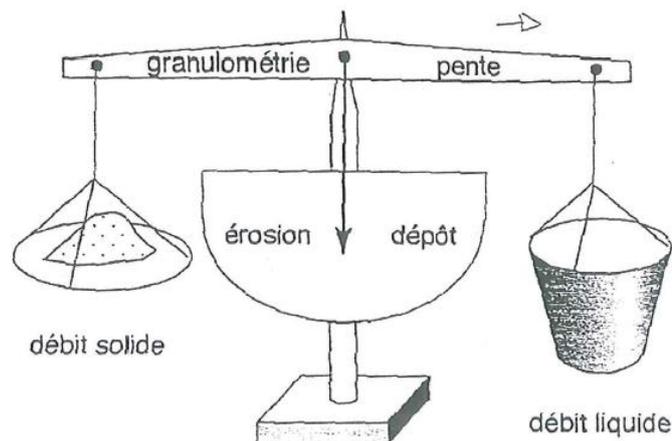


Figure 3 - Schéma conceptuel illustrant les relations entre les différents paramètres qui contrôlent l'évolution du lit d'un torrent.

La capacité de transport de matériau croît quand le débit liquide et la pente augmentent, et quand la taille des matériaux diminue. Dans ces conditions, l'érosion prédomine.

À l'inverse, quand le débit liquide et la pente décroissent, la capacité de transport diminue, ces conditions définissent alors une plage de dépôt.

2.1.4. La dynamique ordinaire et les crises

Les débits liquides et solides varient dans le temps : la morphologie du cours d'eau correspond à un équilibre moyen. Sur les torrents de montagne, les apports liquides et solides varient brutalement : **ils fonctionnent par crise** alors que dans les cours d'eau de vallée et de plaine, les apports sont mieux régulés et la morphologie du lit est relativement stable au cours du temps.

Sur les cours d'eau de plaine, les débits les plus efficaces sont les hautes eaux annuelles. Ces débits sont qualifiés de dominants ou morphogènes. Le débit dominant est celui qui transporte le plus fort volume cumulé. C'est lui qui assure le façonnement permanent du lit (érosion à l'extérieur des coudes, déplacement de bancs...). Les étiages et les débits moyens ne transportent pas de matériaux.

En raison de leur rareté, les fortes crues ne pèsent pas beaucoup dans le bilan annuel moyen (Figure 4). Mais **ces crues exceptionnelles sont les seules capables de modifier profondément la géométrie du lit**, jusqu'à ouvrir de nouveaux bras. Elles peuvent également laisser des bancs importants, que les crues ordinaires auront du mal à reprendre.

La situation est identique, quoique plus marquée dans les bassins versants montagneux en région tropicale. Ce sont les crues exceptionnelles, en période cyclonique le plus souvent, qui modifient profondément la géométrie du lit et provoquent le plus de dégâts (affouillements, érosion de berges). Cependant, on peut penser qu'*a priori*, en termes de volume de matériaux transportés annuellement, les crues exceptionnelles ne sont pas prédominantes.

Il existe un **seuil de débit** à partir duquel les matériaux sont entraînés : il est appelé suivant les auteurs « débit de début d'entraînement » ou « débit critique » et est noté Q_{lc} . Ce débit de début d'entraînement correspond à la contrainte minimale à appliquer sur les éléments constitutifs du lit pour les mettre en mouvement. Il varie selon la nature et la granulométrie des matériaux, et l'historique du lit. En effet si à la suite d'une crue, un tronçon du lit d'un cours d'eau a subi un pavage important, la résistance du lit à l'érosion se renforce et donc le débit de début d'entraînement sera plus fort comme l'illustre la Figure 5.

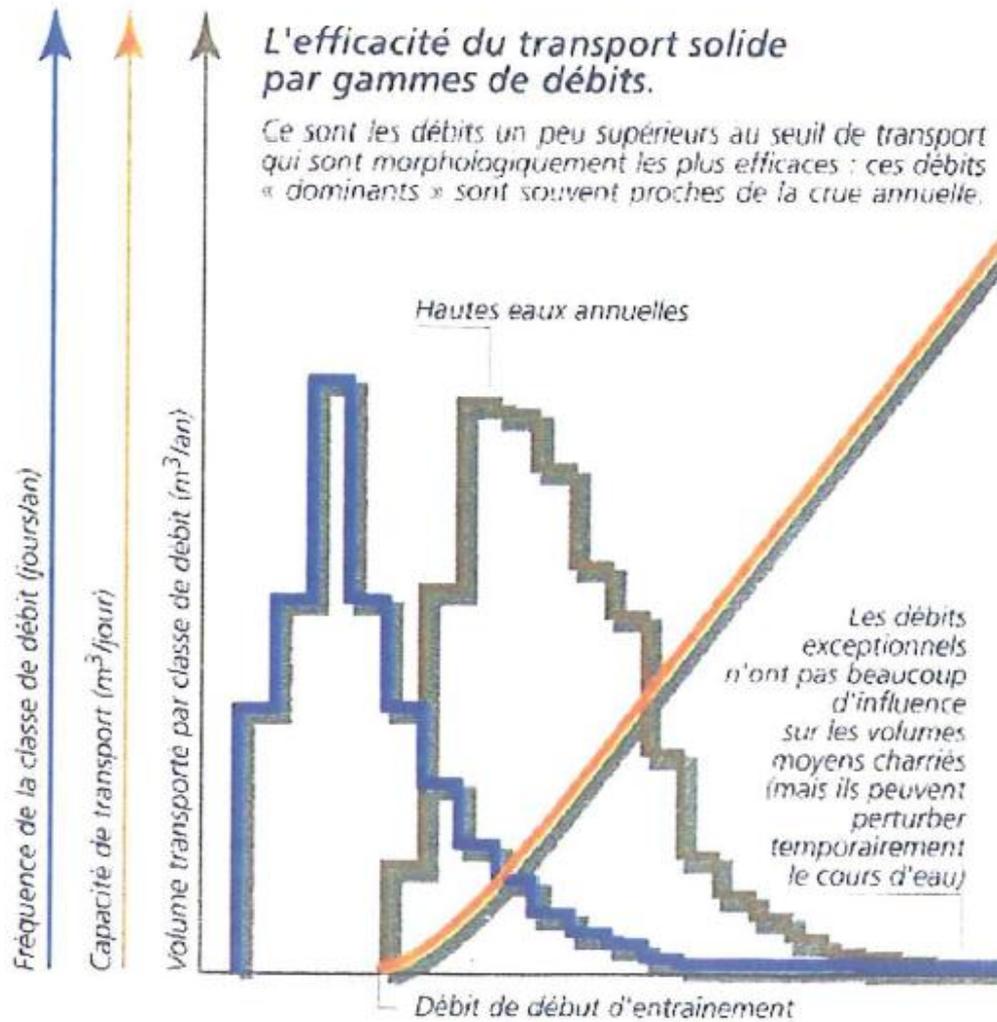


Figure 4 - Efficacité du transport solide par gamme de débit - débit de début d'entraînement (Agence de l'eau RMC, 1999).

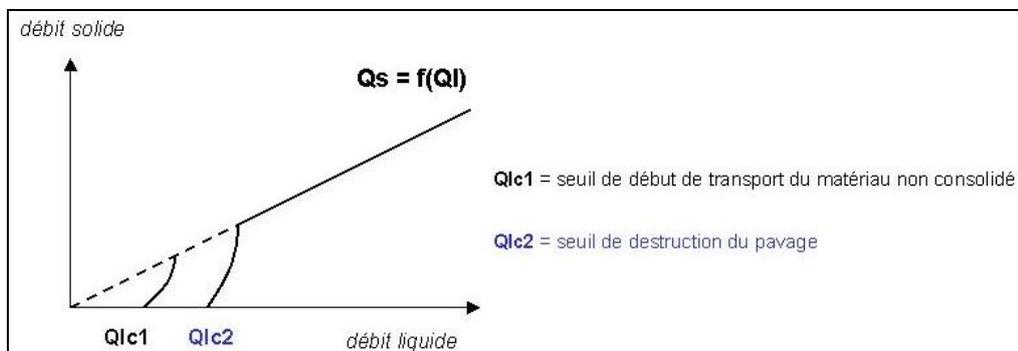


Figure 5 - Effet du pavage sur le débit de début d'entraînement.

2.1.5. Paramètres clés régissant le phénomène de transport solide

Les grandes variables clés régissant le transport solide, soit les seuils de début d'entraînement, et le concept de capacité maximale de transport, sont définies dans l'Annexe 2, tandis que l'Annexe 3 établit un état de l'art sur la modélisation du transport solide.

2.2. CLARIFICATION DU DOMAINE D'ÉTUDE DE L'HYDRAULIQUE TORRENTIELLE

Les concepts de base et les formules analytiques utilisés pour caractériser le transport solide en hydraulique fluviale sont détaillés en Annexe 1. Les différences théoriques entre l'hydraulique torrentielle et celle des rivières y sont également abordées.

2.2.1. Délimitation quantitative de l'hydraulique torrentielle par rapport à l'hydraulique fluviale

Les pentes explorées par les torrents et les rivières torrentielles sont de l'ordre de 2 à plus de 50 %. Les enjeux les plus importants concernent les parties basses des rivières, en particulier les cônes de déjection, où se concentrent les zones urbaines et industrielles ; la pente y est en général comprise entre 4 et 12 %. C'est cette gamme de pente qui intéresse une grande partie des aménagements.

La nature du matériau transporté, sa granulométrie et ses propriétés mécaniques (désagrégation au cours de l'écoulement...) doivent être prises en compte. En hydraulique fluviale, on assimile le plus souvent la granulométrie du matériau transporté à celle du lit, ce qui n'est plus possible en hydraulique torrentielle, où l'on observe une assez grande différence entre la granulométrie du matériau transporté et celle du lit avant, pendant et après la crue (Koulinsky *et al.*, 1994).

En hydraulique fluviale, les concentrations volumiques sont de l'ordre du mg/l, ce n'est plus le cas en hydraulique torrentielle, où les ordres de grandeur sont la centaine de mg/l, ce qui modifie profondément les caractéristiques de l'écoulement. Dans les cas extrêmes où le transport solide représente 50 % du volume de l'écoulement, les phénomènes mis en jeu ont des comportements et des particularités spécifiques, on parle de laves torrentielles. La délimitation entre laves torrentielles et écoulements hyperconcentrés seront discutés par la suite.

2.2.2. Champ de l'hydraulique torrentielle

En partant de l'hydraulique d'eau claire, si on augmente progressivement la quantité de matériau transporté, il existe un seuil à partir duquel les méthodes hydrauliques classiques ne fonctionnent plus car :

- soit le comportement du fluide n'est plus newtonien ;
- soit la hauteur d'écoulement n'est plus assimilable à la hauteur d'eau ;

- soit le solide interagit avec le liquide ;
- soit pour plusieurs de ces raisons à la fois.

À partir de ce seuil ainsi défini, on parle du **domaine des écoulements hyperconcentrés**. Ces écoulements peuvent se rencontrer avec des matériaux fins ou avec du matériau granulaire. Dans ce dernier cas, on parle de charriage hyperconcentré, domaine où la notion de régime permanent uniforme garde encore un sens physique (Meunier, 1991).

Au-delà d'une certaine limite, les écoulements hyperconcentrés font place à un autre phénomène ayant un comportement en bouffées se rapprochant de la mise en place de coulées de laves : **les laves torrentielles**. Elles peuvent être à dominante argileuse ou granulaire. Les premières, les plus fréquemment rencontrées en France, ont une apparence d'écoulement monophasique. Les laves à dominantes granulaires sont plus rares en France mais sont étudiées au Japon. Elles sont appelées laves torrentielles biphasiques car les deux phases, solide et liquide, sont beaucoup plus dissociées que pour les laves torrentielles à dominante argileuse. La notion de régime permanent uniforme n'est alors plus valable. Les expériences menées sur modèle réduit montrent que le seuil de séparation laves torrentielles-écoulements hyperconcentrés correspond à une pente de 20 % et une concentration volumique de matériaux de 30 %.

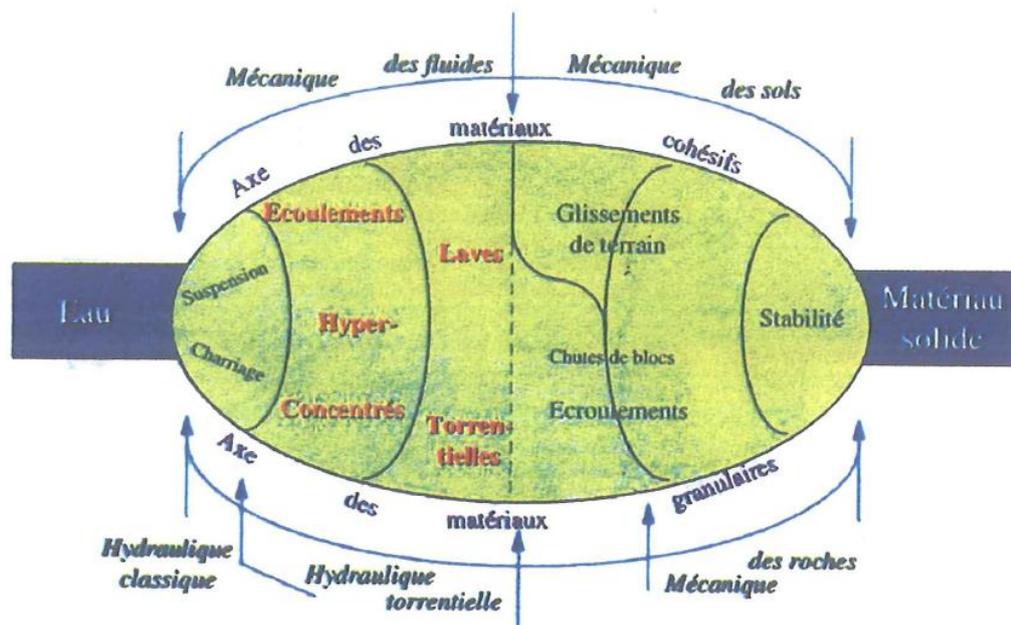


Figure 6 - Phénomènes lents et rapides en hydraulique et mouvements de terrain (Meunier, 1991).

La Figure 6 ci-dessus précise les disciplines scientifiques qui ont pour objet d'étude les différents phénomènes que nous venons de décrire. Selon Meunier (1991), « l'hydraulique fluviale et l'hydraulique torrentielle se distinguent de l'étude de glissements de terrain et des écroulements par le fait que les lois de base sont les

équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement ». Et comme on l'a dit, **l'hydraulique fluviale et l'hydraulique torrentielle se distinguent par le fait que dans le deuxième cas, il faut prendre en compte la phase solide pour résoudre les équations gouvernant la phase liquide.**

2.2.3. Les laves torrentielles

Les laves torrentielles se définissent généralement comme un fluide à une seule phase visqueuse, ce qui les différencie fondamentalement du charriage classique à deux phases : l'une solide, l'autre liquide (à l'exception des laves torrentielles à dominante granulaire décrites précédemment). Elles sont caractérisées par la mise en présence d'une matrice boueuse, dont la composition granulométrique et la teneur en eau sont comprises à l'intérieur d'une fourchette assez étroite, et d'une quantité très variable de matériaux transportés, de granulométrie élevée (cailloux et blocs) (Coussot, 1994).

La genèse des laves implique plusieurs actions : la préparation des terrains en place, la présence d'eau en quantité adéquate, et le mélange des composants.

Les laves torrentielles sont des événements intermédiaires entre les crues et les glissements de terrain. Les écoulements s'effectuent à des concentrations volumiques d'environ 50 % de solide, par bouffées (Figure 7). Ces phénomènes se caractérisent par leur soudaineté et l'importance des volumes impliqués (plusieurs milliers de m³ de matériaux solides). Pour qu'ils se produisent, certaines conditions sont nécessaires : précipitations abondantes et terrains meubles et à forte pente.

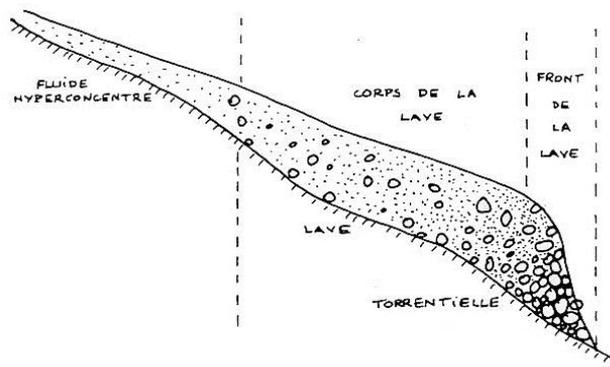


Figure 7 - Bouffée de lave torrentielle (Meunier, 1991).

On peut distinguer, par leur mode de formation, deux types de laves torrentielles :

- les laves de type hydrologiques apparaissent à la suite du lessivage des terrains de surface par des pluies torrentielles dans un bassin versant montagneux ; la crue torrentielle charrie alors des quantités très importantes de terres et de blocs ;
- les laves de type glissement de terrain. Un important glissement de paroi dans les gorges encaissées de rivières en obstrue le lit et parfois donne naissance à un barrage naturel. Les matériaux amassés, gorgés d'eau, sont ensuite transportés par la crue sous forme de laves torrentielles (Cruchet).

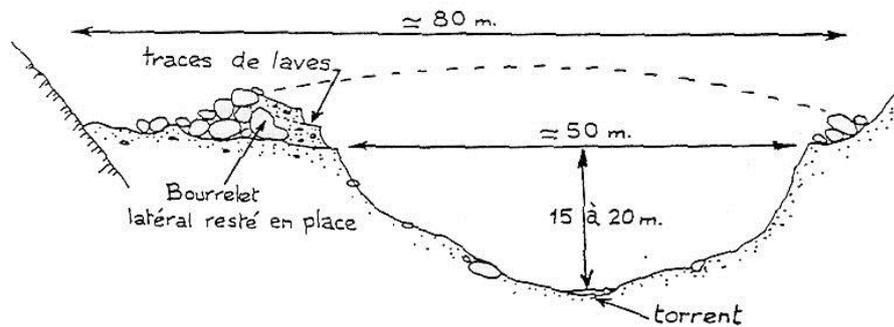


Figure 8 - Lave torrentielle - profil en travers du lit inférieur (Meunier, 1991).

Les matériaux transportés constituent fréquemment des dépôts caractéristiques dont le volume peut être évalué (Figure 8). Brochot *et al.* (2002) suggèrent qu'un important gisement de données peut ainsi être valorisé par des approches globales. La première étape consiste à recenser l'ensemble des mouvements de terrain en les complétant de description du phénomène et du volume de matériau mis en mouvement.

2.2.4. Les écoulements hyperconcentrés

Le critère phénoménologique de délimitation des écoulements hyperconcentrés par rapport aux laves torrentielles est clair : « **les laves torrentielles se produisent en bouffées et les écoulements concentrés non** » (Meunier, 1991).

Des critères de séparation dit « d'écoulement », définis à partir d'essais sur modèles réduits physiques, permettent de séparer charriage classique et charriage hyperconcentré :

- concentration Q_s/Q_l supérieur à 5 % ;
- pente supérieure à 7 ou 10 % ;
- épaisseur de la couche mobile de matériaux mobiles sur le fond de l'ordre de 5 % de la hauteur d'écoulement.

Du côté des faibles pentes, il y a aussi un critère phénoménologique qui permet de distinguer l'hydraulique fluviale des écoulements hyperconcentrés : avec ces derniers, le transport solide se produit par paquets, qui s'arrêtent puis repartent, déplaçant en permanence l'écoulement latéralement, dans un méandrage à petite échelle très rapide et continu au cours de la crue. Les concepts de largeur moyenne et de hauteur moyenne de l'écoulement sont alors très difficiles à quantifier avec un tel comportement du transport solide. **Ce critère permet de ranger le fort transport solide des rivières torrentielles dans le domaine des écoulements hyperconcentrés** qui débute à des pentes de 2 à 6 % (Figure 9). Dans le domaine des écoulements hyperconcentrés, on peut admettre qu'il existe une relation entre le volume de la crue et le débit de pointe alors qu'il n'y en a aucune pour les laves torrentielles.

La suite de cette analyse bibliographique est consacrée aux **écoulements hyperconcentrés** et à leurs conséquences sur l'aménagement et l'équilibre morphologique des cours d'eau.

2.3. SYNTHÈSE

Ce que l'on doit retenir de cette présentation générale du transport solide est que les torrents et les rivières torrentielles fonctionnent par crise durant lesquelles débits liquides et débits solides varient brutalement. Les matériaux sont mobilisés et transportés en période de hautes eaux, mais ce sont les crues exceptionnelles qui sont seules capables de bouleverser la morphologie du lit. En plus des **facteurs de pente, de granulométrie et de débits liquides**, la quantité de matériaux déplacés dépend de la **quantité de matériau disponible au moment de la crue**. Enfin, le débit de début d'entraînement varie d'une crue à l'autre, suivant la granulométrie des matériaux transportés et les effets des crues antérieures.

3. Les enjeux de la gestion du transport solide

Le chapitre précédent a présenté la problématique du transport solide. Ce chapitre vise à montrer les conséquences de ce phénomène, notamment sur l'équilibre morphologie des rivières et des hydro-systèmes. Cet état des lieux permet d'identifier les problématiques et de clarifier l'enjeu de la gestion du transport solide en général.

3.1. PRÉLIMINAIRES : PRÉSENTATION DES CLASSIFICATIONS FLUVIALES ET APPLICATION À TAHITI

3.1.1. Caractérisation des rivières par leur morphologie

Dans un premier temps, dès 1927, on a cherché à classifier, de manière très simple, les cours d'eau (Richard, 1997) :

- les cours d'eau de pente longitudinale inférieure à 1 % sont appelés rivières ;
- ceux dont la pente est comprise entre 1 et 6 % sont des rivières torrentielles ;
- enfin, lorsque la pente est supérieure à 6 %, on parle de torrents.

Il est bien évident qu'une telle classification est nécessairement réductrice compte tenu de sa simplicité. Pour autant, elle a le mérite de mettre l'accent sur un paramètre essentiel qu'est la **pente**. Selon cette classification, la plupart des cours d'eau de Tahiti sont torrentiels.

Dans un second temps, une approche naturaliste, basée sur la morphologie des cours d'eau, distingue quatre grands **types morphologiques** correspondant à une énergie, et donc à une pente décroissante d'un cours d'eau de granulométrie donnée (Agence de l'eau RMC, 1999) :

- les torrents ;
- les rivières en tresse ;
- les rivières à méandres divagants ;
- les rivières à lit peu mobile, unique ou multiple.

D'amont en aval, les cours d'eau présentent normalement la succession de plusieurs styles, au fur et à mesure de la décroissance de la pente de l'écoulement.

À titre d'illustration, la Figure 10 présente les différents types morphologiques en fonction de la pente et la Figure 11 permet de visualiser la forme du profil en long de quelques-unes des principales rivières de Tahiti. À l'aide de ces deux figures, on peut ainsi prévoir, par suite de la présence de la plaine littorale, que la plupart des rivières de Tahiti vont comporter plusieurs styles, fonction de l'évolution de la pente.

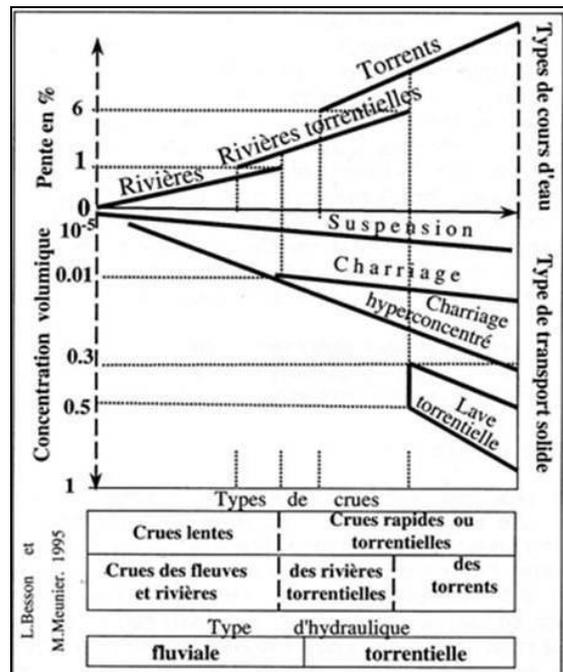


Figure 9 - Représentation des divers types de cours d'eau et des modes de transports associés en fonction de la pente et de la concentration volumique (Besson et Meunier, 1995).

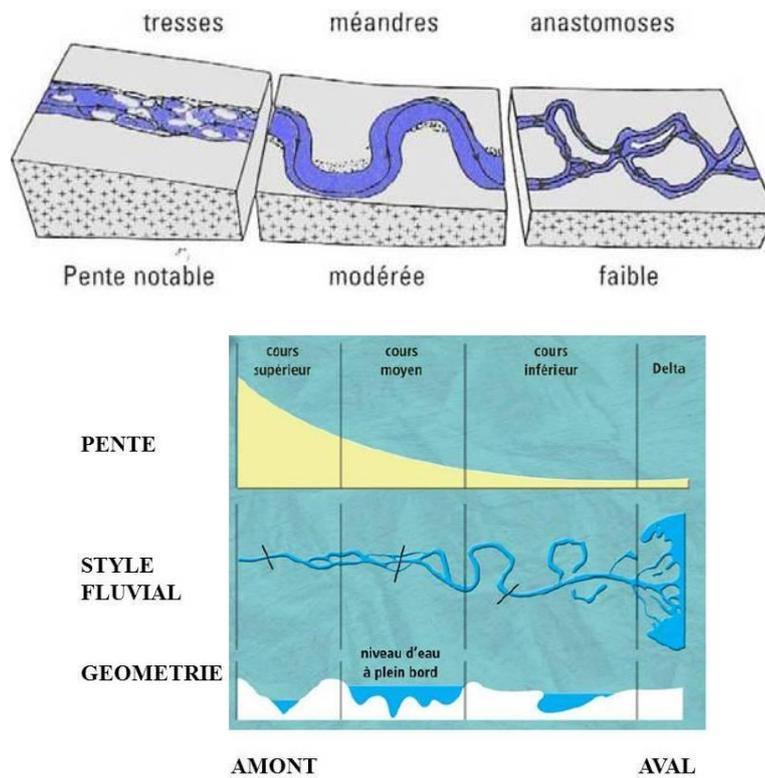


Figure 10 - Différents types morphologiques en fonction de la pente.

Enfin, au regard du **transport de matériaux**, un système torrentiel est composé :

- en amont, par un réseau de ravins drainant le bassin de réception, et connecté à un thalweg principal qui concentre les flux d'eau et de débris et assure leur transit vers l'aval. Dans cette partie du cours d'eau, l'érosion prédomine ;
- en aval, en pied de versant se développe le cône de déjection où, en raison de la diminution brutale de la pente, la puissance des écoulements chute rapidement et les matériaux solides transportés se déposent.

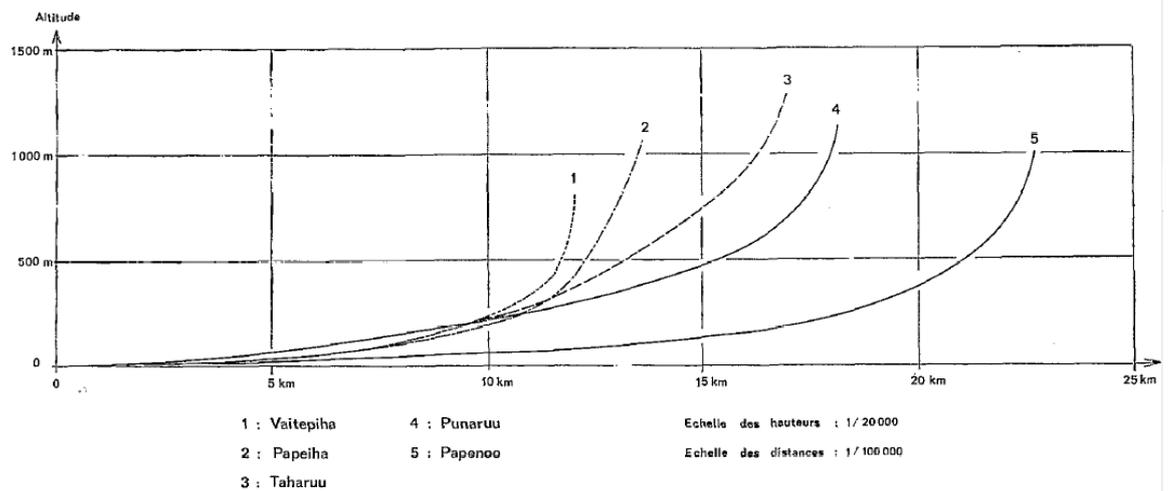


Figure 11 - Profil longitudinal de quelques-unes des principales rivières de Tahiti ([1] J. SERVANT, 1974).

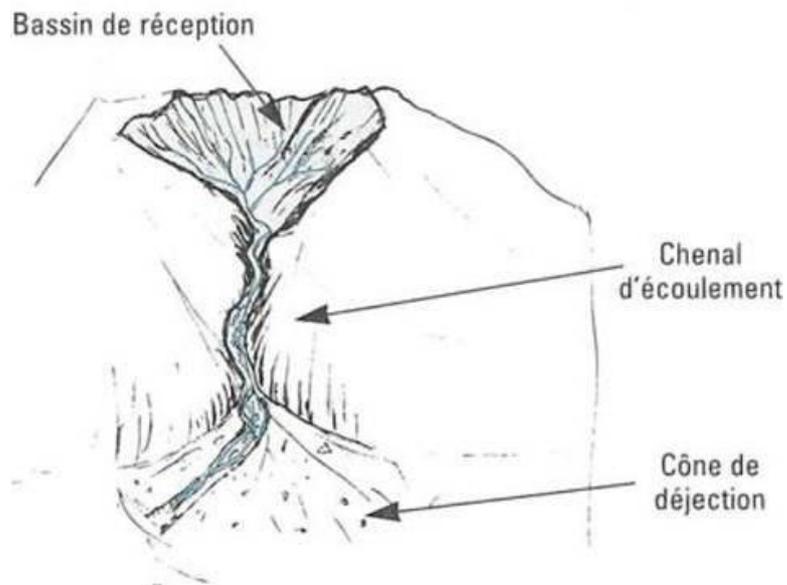


Figure 12 - Système torrentiel type.

3.1.2. Caractérisation des rivières par leur régime de crue

Une autre caractéristique des torrents, relative à leur caractère montagneux et pentu, est leur régime de crue. Les torrents sont le lieu de **crues soudaines et violentes**, elles sont souvent provoquées par des précipitations elles-mêmes violentes et abondantes. Ce sont des crues à dynamique rapide : quelques heures au plus séparent la montée des eaux dans la rivière de la pluie qui l'a provoquée.

Les torrents ont un comportement spasmodique avec une montée en crue brutale et un tarissement rapide. À l'inverse, les rivières de plaine ont des dynamiques de crues plus lentes et étalées dans le temps ; leur montée en crue et leur décrue sont progressives (Jordan, 1994).

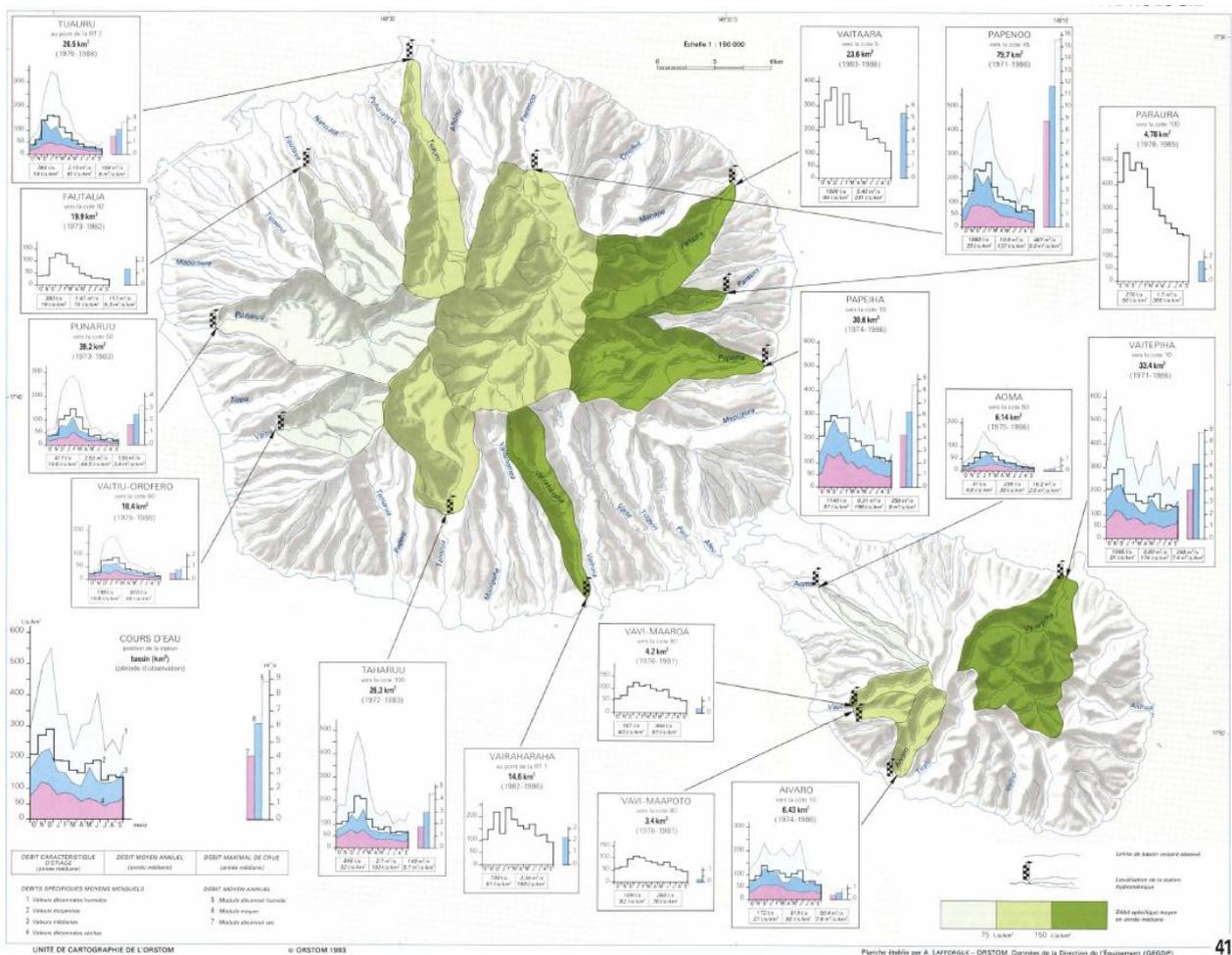


Figure 13 - Caractéristiques hydrologiques des principales rivières de Tahiti (Atlas ORSTOM, 1993).

En conclusion, pour décider du caractère torrentiel d'une crue, outre la morphologie du cours d'eau, il semble que ce sont souvent les caractéristiques hydrologiques qui sont d'abord retenues. On s'intéressera donc aux **régimes pluviométriques** et aux

caractéristiques particulières des **bassins versants montagneux**. On notera, d'ores et déjà, l'importance des débits de crue des différents bassins versant de Tahiti (Figure 13).

3.2. INTERACTION ENTRE TRANSPORT SOLIDE ET MORPHOLOGIE D'UN COURS D'EAU

On imagine facilement que toute perturbation, d'origine naturelle ou anthropique, d'un des éléments de l'équilibre sédimentologique d'un cours d'eau (débit liquide, débit solide, granulométrie des matériaux, pente du cours d'eau) conduit à une adaptation de la morphologie du cours d'eau aux nouvelles conditions.

3.2.1. Rappel : mécanismes élémentaires d'ajustement du profil en long

Le profil en long est, avec le régime hydrologique d'un cours d'eau, une grandeur caractéristique pour étudier la dynamique fluviale. La stabilité dans le temps du profil en long révèle que le cours d'eau est en équilibre. Cette notion est relative et dépend de la durée d'observation entre deux relevés.

Sa variation dans l'espace est le plus souvent liée à des variations de transport solide provenant de causes externes ou à des variations des débits liquides.

Les perturbations d'origine anthropique (aménagements de protection contre les crues, ouvrages de franchissements des cours d'eau, extractions de matériaux alluvionnaires) ou naturelles (glissements de terrains) portent principalement sur la pente et sur les débits solides liquides. La Figure 14 illustre les mécanismes généraux d'ajustement de la pente des cours d'eau.

- Si la pente est trop faible, il y aura dépôt jusqu'à ce que la pente soit assez forte pour assurer le transit.



- Si la pente est trop forte, il y aura érosion jusqu'à ce que la pente assure le seul transport solide amont

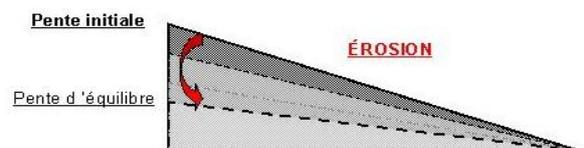


Figure 14 - Mécanisme d'ajustement de la pente.

3.2.2. Variations de pente le long d'un cours d'eau

La pente décroît habituellement d'amont en aval, sous l'effet de trois causes :

- l'usure du matériau ;
- le triage : les granulométries plus petites sont transportées plus facilement et plus souvent que les éléments plus grossiers ; c'est le phénomène du charriage partiel ;

- l'accroissement du débit liquide : les affluents d'aval, affluents de plaine, fournissent plus d'eau que de matériaux.

Cassures de pente sans apports externe

Dans une cassure de pente, par exemple à l'arrivée dans une plaine littorale, le charriage des galets s'amointrit et la rivière change de caractéristiques de transport. La cassure peut être brutale ou progressive. Il est fréquent qu'elle s'accompagne d'une divagation intense, car cette divagation correspond à l'étalement des dépôts des matériaux grossiers.

Evolution du cours d'eau d'amont vers l'aval ou au cours du temps dans un même lieu

**A : érosion linéaire
(verticale)**

**B , C : érosion linéaire
+ aréolaire**

**D : érosion aréolaire
avec linéaire plus
faible (V inf.) d'où
dépôt**

E : érosion aréolaire

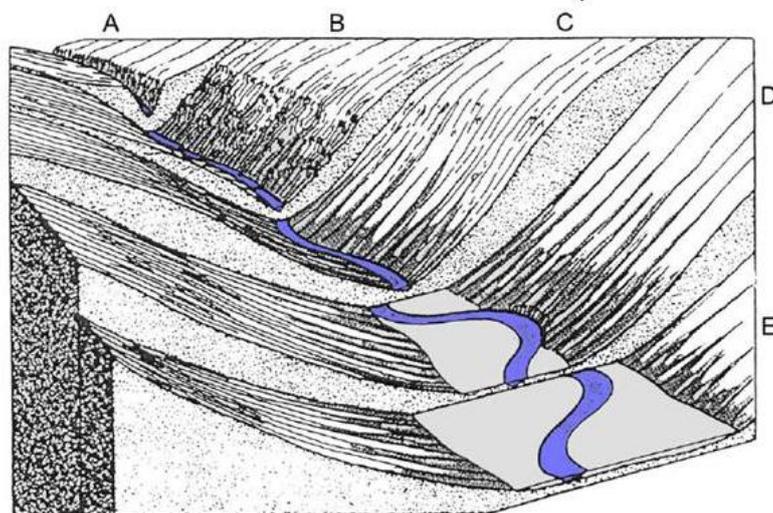


Figure 15 - Évolution d'un cours d'amont vers l'aval et/ou au cours du temps.

La cassure de pente peut se déplacer vers l'amont ou vers l'aval. Si les éléments fins sont beaucoup plus volumineux que le charriage grossier, le point de cassure remonte vers l'amont. Si les éléments fins sont moins volumineux, la cassure se déplace vers l'aval.

Le tronçon aval est en équilibre si les matériaux qu'il reçoit sont acheminés jusqu'à la mer et repris par le transport littoral sous l'effet de la houle. Si la rivière s'allonge en mer, la rivière va très lentement s'exhausser.

Apports latéraux d'éboulis ou de torrents

En bassin versant de montagne, il est fréquent que les torrents apportent une quantité importante de matériaux. Cela induit un déficit des débits liquides devant la masse de matériaux disponibles.

À l'aval de la perturbation, la pente dans le tronçon va alors augmenter pour rétablir l'équilibre (augmentation de la capacité de transport). Il s'ensuit un exhaussement à l'amont du tronçon.

3.2.3. Interaction entre transport solide et morphologie d'un cours d'eau

Les perturbations des équilibres morphologiques peuvent provoquer des changements du style morphologique du cours d'eau et vice versa. Ce changement est évident pour les rivières largement divagantes qui, une fois aménagées, sont contraintes en largeur par des endiguements.

La transition tressage-méandrement est un signe caractéristique de perturbations. Le tressage est un signe d'excédents relatifs de matériaux (Figure 16). Le méandrement (Figure 17) traduit au contraire un certain déficit relatif.

Chenaux multiples très mobiles, grande largeur et peu de profondeur

Conditions

- Charge de fond surabondante
- Des berges facilement érodables
- Débit très variable
- Pente ou puissance forte



Zone de stockage/ destockage des sédiments

Figure 16 - Exemple de lit en tresses : Taharuu.

Inversement, un accroissement des apports solides peut favoriser le passage d'un style à méandres à un style en tresse. Comme le résume parfaitement le guide méthodologique de l'Agence de l'Eau RMC (1999) « *la modification artificielle de la géométrie du lit perturbe localement les conditions du transport solide car la géométrie du lit est la résultante des conditions de transport solide* ».

Au droit de ces transitions, le transport par charriage va laisser peu à peu la place au transport en suspension. Ce dernier pourra être alimenté en sédiments par l'érosion des berges. En aval, les sédiments transportés pourront se déposer au gré des méandres (les plus gros) et faire ainsi « vivre » le cours d'eau ou atteindre l'exutoire (pour les plus fins).

Les lits en méandre sont, en effet, en évolution permanente par « respiration » c'est-à-dire déplacement, à moyen terme, de l'emplacement de ces méandres (Figure 18), raison pour laquelle il convient de permettre cette évolution.



Figure 17 - Exemple de lit en méandres : Titaavirii.

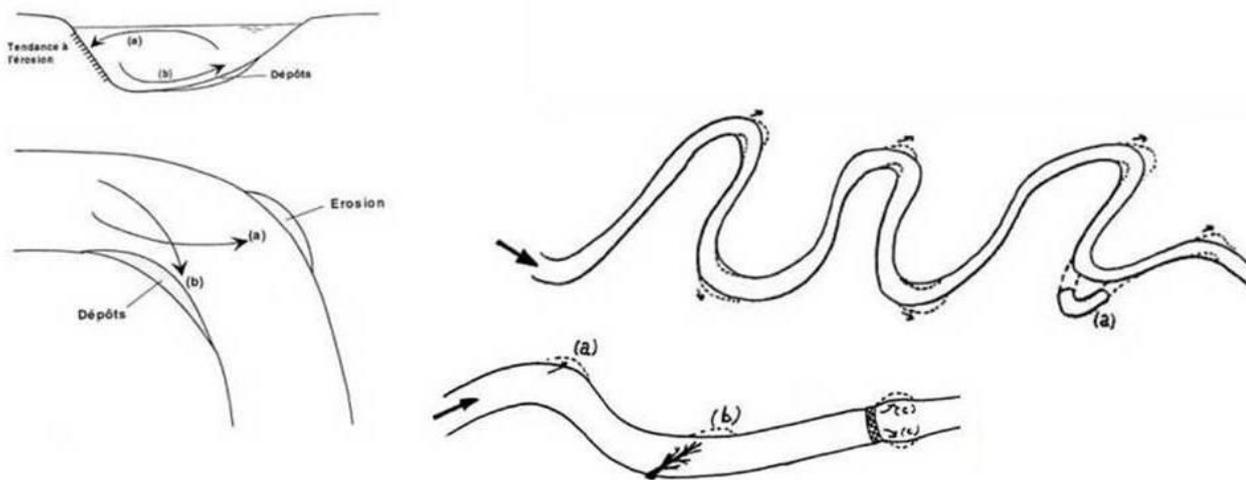


Figure 18 - Évolution permanente des méandres.

3.3. IMPACTS DU TRANSPORT SOLIDE SUR L'HYDROSYSTÈME

La dynamique morphologique du lit entretient des relations étroites avec les autres compartiments de l'hydro-système que nous allons présenter dans ce chapitre.

3.3.1. Interactions avec la nappe

Les relations entre la rivière et sa nappe d'accompagnement sont souvent prépondérantes dans l'équilibre de celle-ci. L'abaissement du lit se répercute directement sur le niveau du toit de la nappe, entraînant des pertes de ressource qui peuvent être importantes. Par ailleurs, le colmatage du lit en cas de dynamique fluviale amoindrie peut réduire les relations entre la nappe et la rivière.

3.3.2. Interactions avec le milieu naturel aquatique

La dépendance du milieu naturel aquatique à l'état physique du lit est une évidence. Le fonctionnement morphologique du lit du cours d'eau commande plusieurs paramètres clés de la qualité des milieux :

- les paramètres hydrauliques des écoulements (vitesse, hauteur d'eau, variabilité de ces paramètres dans l'espace et dans le temps) ;
- l'état du substrat (nature des matériaux du lit) : deux types de perturbation méritent une attention particulière. La disparition du matelas alluvial, au profit d'affleurements du substratum rocheux, réduit fortement les habitats de la faune aquatique et le potentiel d'autoépuration du milieu. Le colmatage du lit et des bancs par des limons a également une influence en général déclassante.

3.3.3. Interactions avec les milieux naturels riverains

Les milieux alluviaux sont le produit des processus morphologiques. La dégradation de l'équilibre morphologique perturbe ces milieux par plusieurs voies conduisant souvent à un assèchement et à un vieillissement de ces milieux qui, ainsi, perdent leur connexion fonctionnelle avec la rivière.

L'abaissement de la nappe, suite à un abaissement du lit, provoque un assèchement des milieux alluviaux humides et une disparition des bras morts. La réduction de la dynamique fluviale empêche un renouvellement des milieux alluviaux par érosion latérale. À l'inverse, le colmatage par les limons des terrasses qui ne sont plus érodées renforce la déconnexion de ces milieux.

3.3.4. Interactions avec les autres usages des cours d'eau

L'abaissement des lits perturbe les prises d'eau sans ouvrage : la réalisation d'un ouvrage de maintien des niveaux est rendue souvent nécessaire.

L'enfoncement des lits met en péril les ouvrages, ponts digues, seuils, avec des conséquences économiques souvent importantes.

3.3.5. Interactions avec le lagon

L'arrivée de matériaux fins jusqu'au lagon provoque un apport terrigène particulièrement néfaste pour la santé des coraux.

3.4. ARGUMENTS POUR LA GESTION DU TRANSPORT SOLIDE

Le cours d'eau est en équilibre dynamique d'un point de vue morphologique mais est aussi en relation étroite avec les divers composants de l'hydrosystème.

Nous avons montré les perturbations que pouvait entraîner le transport solide sur la morphologie des cours d'eau. Ces perturbations de l'équilibre morphologique peuvent ensuite avoir des incidences majeures sur les autres composantes, et ce sont ces incidences, jugées inacceptables, qui conduisent souvent à chercher à corriger ces déséquilibres.

À l'échelle du bassin versant, la gestion du transport solide recouvre donc :

- un enjeu environnemental, la qualité des milieux dépend souvent de l'intensité des processus morphodynamiques, et des connexions entre le lit principal et les milieux latéraux (notamment les apports terrigènes particulièrement néfastes pour la santé des coraux dans le lagon) ;
- un enjeu économique, car les travaux de confortement imposés par les déséquilibres du lit sont souvent onéreux ;
- un enjeu paysager, car les interventions incessantes dans le lit peuvent durablement le défigurer ;
- un enjeu en termes de ressources en eau (abaissement de la nappe, intensité des relations nappe - rivière selon l'état du fond et des berges, fonctionnement des prises d'eau) ;
- un enjeu sur les usages de la rivière et de ses abords (loisirs, hydroélectricité).

4. Érosion des sols et apports de matériaux aux rivières à Tahiti

Prévenir et corriger ces déséquilibres nécessite d'être capable de connaître puis de quantifier les apports de matériaux, à l'origine du phénomène de transport.

Ce chapitre présente les problématiques d'érosion et d'apport de matériaux aux rivières en général, puis appliquées à l'île de Tahiti, et fait un point sur l'existant en matière de connaissance qualitative et quantitative de ces apports de matériaux. L'approche est volontairement naturaliste dans un premier temps, et vise à introduire la multiplicité des mécanismes physiques qui entrent en jeu dans les phénomènes d'érosion et de transport solide dans les rivières torrentielles.

4.1. LES PHÉNOMÈNES D'ÉROSION DANS LES BASSINS VERSANTS MONTAGNEUX

4.1.1. Quelques caractéristiques des bassins versants montagneux

Les caractéristiques topographiques, géologiques, et pédologiques du bassin versant jouent un rôle essentiel dans son comportement hydrologique. Ces caractéristiques générales sont applicables à tous les types de bassin versant (BV) ; néanmoins, les bassins montagneux étant spécifiques, certains paramètres nécessitent des précisions :

- la détermination des limites des bassins versants topographiques est une question classique de l'hydrologie qui ne pose pas de problème spécifique en montagne. Mais la délimitation de **l'origine des lits en amont** est beaucoup plus délicate et dépend de l'échelle d'investigation : la végétation peut masquer la réalité, et la transition entre lits torrentiels et ravins est progressive (Brochot *et al.*, 1998). Amoros et Petts (1993) proposent de retenir un critère de **présence du plancher ou fond alluvial** (adapté au torrent, c'est-à-dire éventuellement restreint et discontinu dans l'espace et le temps)
- **la pente** doit être également définie précisément : pente des versants, des lits, pente moyenne, pente locale, etc. De nombreux auteurs utilisent la dénivelée spécifique (D_s) qui est un critère robuste adapté au contexte montagneux :

$$D_s = \frac{\text{Dénivelée entre le point le plus élevé du BV et l'exutoire}}{(\text{surface totale})^2}$$

- **la granulométrie des versants** est, comme celle des lits, une variable importante, complémentaire de la couverture végétale dans le cas des bassins versants montagneux. Elle fait l'objet de techniques d'échantillonnage et de mesure qui seront détaillées par la suite.

4.1.2. Typologie des phénomènes d'érosion

Le transport de quantités importantes de matériaux est la caractéristique essentielle des crues torrentielles. Ces matériaux proviennent des phénomènes d'ablation, de transport et de dépôt, intervenant dans l'ensemble du bassin versant ; ce sont des phénomènes d'érosion, dont la crue fait elle-même partie.

La distinction au sein des bassins versants montagneux des deux types de structure les composant, les versants et les lits, facilite l'analyse de leur fonctionnement érosif (Brochot *et al.*, 1998) :

- sur les versants, correspondant à la notion géomorphologique d'interfluve, les phénomènes sont d'abord aréolaires : on peut toujours se ramener à un raisonnement par unité de surface ; ils fonctionnent chacun selon leur propre échelle de temps, souvent sans commune mesure avec celle de la crue ;
- dans les lits, les phénomènes sont d'abord orientés linéairement ; ils ne se produisent que pendant la brève période de la crue.

Sur les versants, les géomorphologues distinguent les processus de fragmentation et d'altération en place, des processus mobilisateurs que sont les mouvements de débris (Figure 19).

L'étude de tous ces processus érosifs est complexe : ils s'exercent à de multiples échelles de temps et d'espace. Cette multiplicité des échelles implique des relais entre les processus et des discontinuités dans les flux de matériaux car il s'y ajoute des effets de seuil (Peyri et Marnezy, 1994). En effet, les matériaux sont arrachés, transitent le long des pentes, se déposent, puis sont repris par un événement pluvieux ultérieur.

Dans ces conditions, la quantification de la production de matériaux des versants, mis à disposition du torrent, est donc extrêmement difficile car :

- les mesures sont rares ;
- les connaissances sur les mécanismes fondamentaux et la modélisation physique fonctionnelle sont peu développées ; elles se limitent à quelques processus pris isolément (altération chimique, transports par les eaux, glissements de terrains, chutes de blocs) et sont loin d'intégrer l'ensemble des processus érosifs de versants ;
- jusqu'à présent, aucune analyse des pratiques d'expert mises en œuvre sur une application donnée n'a été assez robuste pour pouvoir être identifiée en tant que méthodologie d'ingénierie.

Dans les lits, les écoulements possèdent une certaine potentialité à transporter les sédiments. Il existe une capacité maximale de transport : si cette limite est dépassée, les sédiments en excès se déposent ; si cette limite n'est pas atteinte, le lit est susceptible de s'éroder : cela va dépendre de sa résistance. La crue est, selon Brochot *et al.* (1998), le phénomène intégrateur qui assure la continuité des flux de matériaux (Figure 20) : les matériaux produits sur les versants peuvent parvenir jusqu'au lit du

torrent ; devenus des sédiments, ils sont alors mis à la disposition des écoulements qui vont survenir de façon immédiate ou différée, et qui sont susceptibles (ou non) de les transporter.

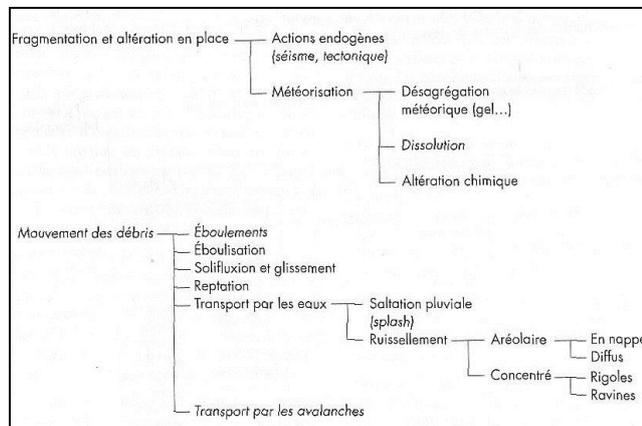


Figure 19 - Les processus d'érosion sur les versants montagneux (Brochot et al., 1998).

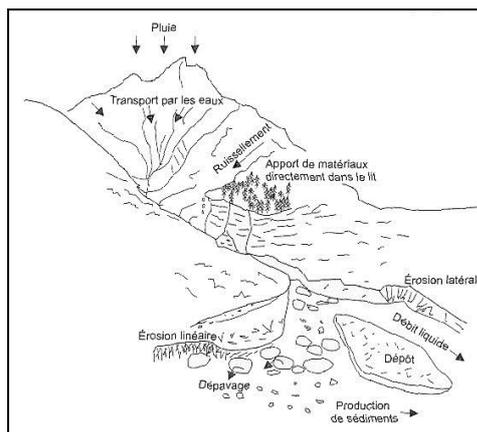


Figure 20 - Représentation du fonctionnement des bassins versants torrentiels en crue (Brochot et al., 1998).

4.2. L'ORIGINE DES MATÉRIAUX DANS LES RIVIÈRES

S'il est capable d'entraîner des matériaux fins, issus de l'érosion des sols, l'écoulement diffus des eaux de pluies sur la surface de l'impluvium n'est en général pas capable de désagréger le terrain offrant une certaine cohésion. Selon Brochot (1998), la végétalisation des versants en pente suffit le plus souvent à empêcher le mouvement d'ensemble des matériaux. Ce sont les débits concentrés du cours d'eau qui ont le plus souvent une action érosive. En général, avant transport, il y aura désagrégation préalable dont la cause d'érosion initiale peut être la suivante :

- l'éboulis, produit de la décomposition de la roche sous l'action de facteurs climatiques, que la rivière (ou torrent) attaque à la base et dont elle se charge avec les matériaux arrachés ;

- le glissement qui est le produit combiné de l'attaque du versant par le pied et de la mauvaise qualité du sol. Les glissements sont liés à la nature du matériau, à la pente, aux facteurs climatiques, etc. Une faible variation du fond de la rivière peut suffire à déclencher un glissement ;
- les éboulements qui naissent de la dégradation de la roche en place ; des masses de plusieurs milliers de m³ obstruent alors le fond de la vallée (cf. Figure 21) ;
- les désagrégations superficielles dont la cause la plus courante est liée au climat, aux animaux, à l'homme...



Figure 21 - Glissement dans le bassin amont de la Papenoo (10/2003).

En cas de crue, dans la partie amont du bassin versant, les conséquences de l'érosion sont donc de mettre à disposition d'un cours d'eau des volumes de matériau importants.

4.3. LES FACTEURS DE L'ÉROSION DES VERSANTS À TAHITI

4.3.1. Généralités

Les processus érosifs sont gouvernés par des facteurs favorables ou contraires à l'érosion. Ces facteurs interagissent et peuvent, selon Brochot *et al.* (1998), être regroupés en cinq groupes principaux :

- facteurs climatiques : pluie, neige, gel/dégel (alternance/intensité) ;
- facteurs géologiques : lithologie, tectonique ;
- facteurs géomorphologiques : pente, exposition, altitude, formations superficielles ;
- couverture végétale ;
- facteurs anthropiques.

On peut ajouter un sixième facteur en pensant aux événements intervenus antérieurement dans la formation des héritages. Ce facteur « historique » a, en général, une distribution spatiale différente des facteurs actuels et peut interagir avec ces derniers dans le cas d'événements de grande ampleur (Brochot *et al.*, 1998).

Ces facteurs sont interdépendants, ce qui rend difficilement prévisible le sens dans lequel ils jouent. Néanmoins, on peut classer les facteurs suivant leur action :

- les facteurs qui interviennent dans la constitution d'un stock ou qui sont intervenus antérieurement (cas des héritages ou facteurs historiques), par fragmentation / altération ;
- les facteurs qui interviennent dans la mobilisation.

Cette description qualitative des processus d'érosion en bassin versant montagneux montre la multiplicité des causes, des processus, et des facteurs d'érosion. La situation en montagne est bien différente de celle prévalant en érosion agricole où des modèles de toutes sortes sont opérationnels, dans la mesure où les processus quantifiés se limitent au transport par les eaux.

Aussi, en montagne, en dehors des rares cas où la quantification doit s'effectuer sur la zone de représentativité d'un site expérimental, une méthode spécifique est à mettre au point et à valider : modèle empirique, conceptuel, symbolique, typologie, analyse de données historiques..., son ambition doit en général se restreindre à une évaluation globale de la production de matériaux des versants, tous processus confondus (Brochot, 1993).

4.3.2. Facteurs climatiques et couverture végétale

L'intensité des pluies observées en milieu tropical joue un rôle prédominant dans l'intensité des processus érosifs. Mais c'est le caractère montagneux des bassins versants qui explique l'importance des taux de dégradation observés (Figure 22).

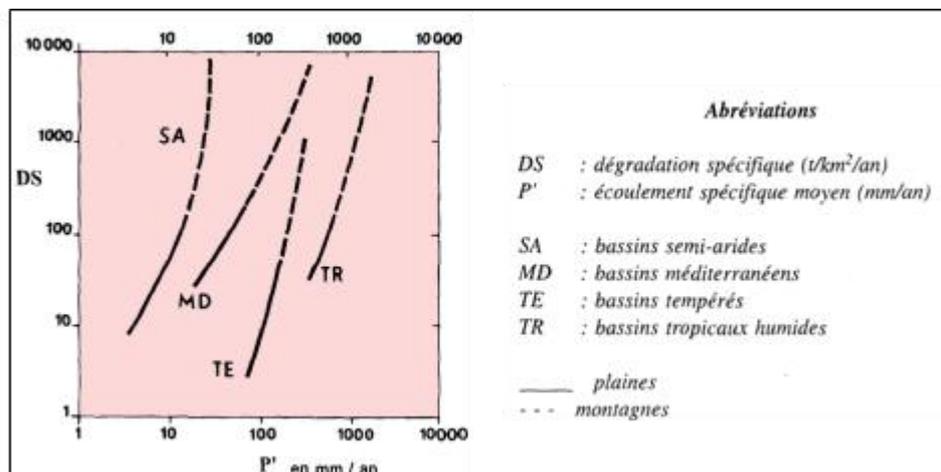


Figure 22 - Efficacité érosive des bioclimats calculée sur la base de la turbidité des cours d'eau.

Le couvert végétal, lorsqu'il existe, protège le sol en retenant l'eau de pluie, lui donnant le temps de percoler vers les réservoirs souterrains pour aller ensuite, graduellement, grossir les cours d'eau. Sur un terrain en pente, lorsqu'il n'y a pas ou plus de couvert

végétal, l'eau de pluie ruisselle au lieu d'être retenue et de s'infiltrer. Cela a deux conséquences primordiales : d'une part, les crues y sont potentiellement plus fortes que sur un sol couvert, d'autre part, l'eau arrache et entraîne une plus grande quantité de particules du sol, provoquant alors une importante érosion.

Plus précisément, Meunier (1996) a examiné le rôle du couvert forestier en comparant les crues observées sur des bassins expérimentaux globalement similaires dont seul le taux de dénudation différait : 78 % pour l'un, 13 % pour l'autre. Il a constaté un rapport de 10 entre les débits de pointe du bassin dégradé et ceux du bassin boisé. Meunier (1996) explique ce phénomène de la manière suivante : « *Le couvert forestier joue un rôle efficace dans l'écoulement des pluies, il sert de réservoir tampon de stockage pour absorber le ruissellement et réduire la vitesse du courant* » (Meunier, 1996).

L'atlas de 1993 de l'ORSTOM présente une carte de la végétation des îles de Tahiti et Moorea.

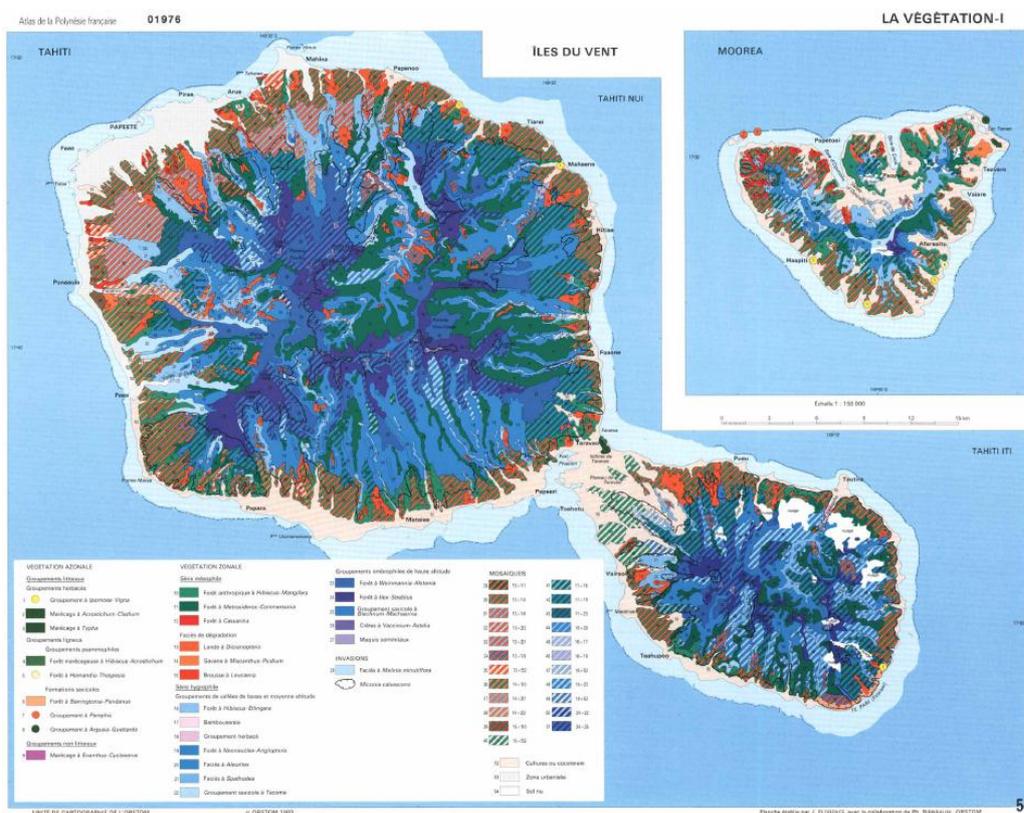


Figure 23 - Carte de la végétation des îles de Tahiti et Moorea (Atlas ORSTOM 1993).

4.3.3. Facteurs géologiques et/ou pédologiques

Dans son atlas de 1993, l'ORSTOM (Jamet) dresse, au moyen de plusieurs cartes, une carte pédologique et une carte d'aptitude culturale et forestière des sols. Pour la géologie, il existe une carte géologique de 1965 réalisée par le BRGM.

4.3.4. Facteurs géomorphologiques

Une carte géomorphologique (Figure 24) est également disponible dans l'atlas de l'ORSTOM (1993). Suite à une étude spécifique faisant appel à la datation, une nouvelle carte a été produite à l'occasion d'une thèse (cf. biblio. [3]).

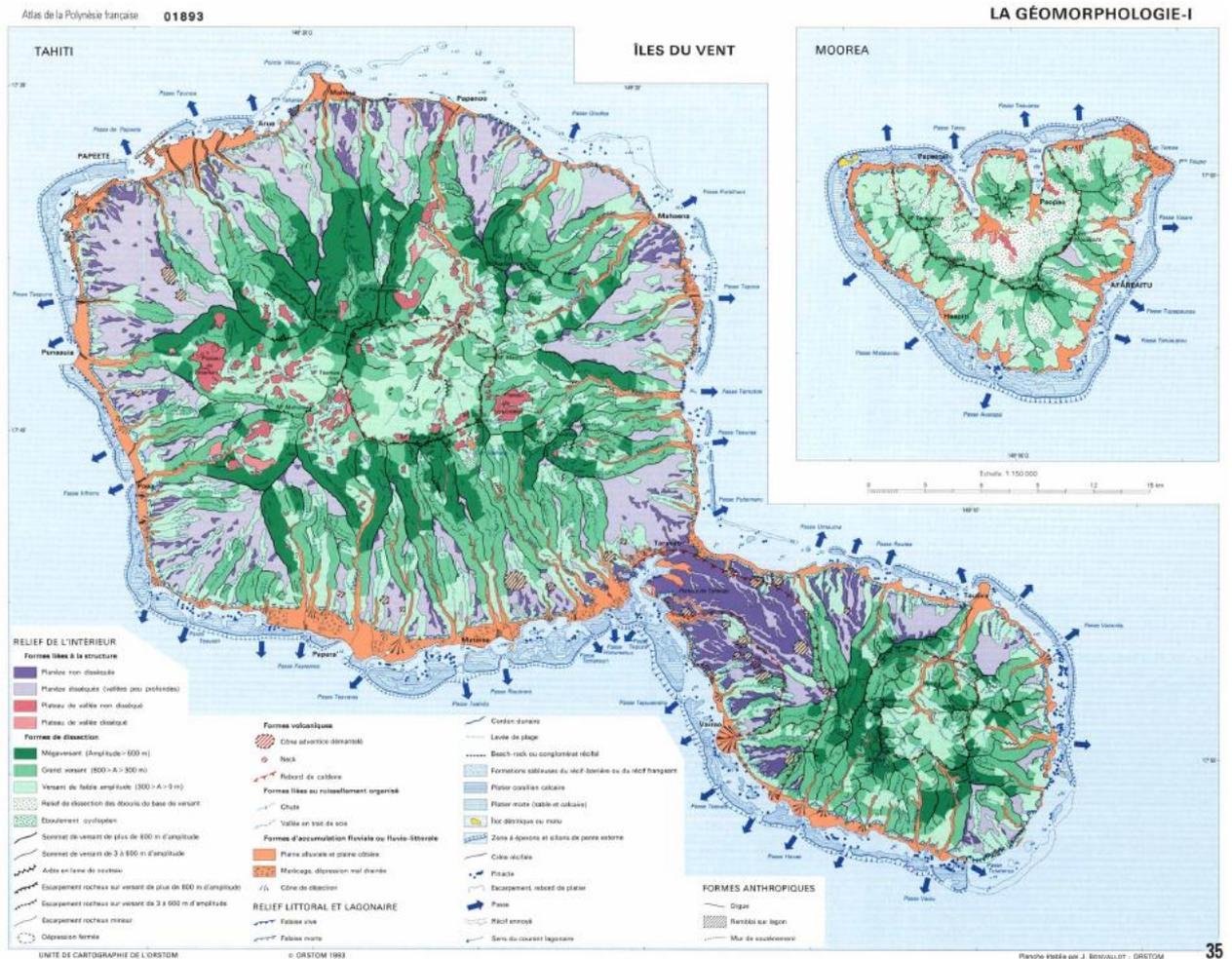


Figure 24 - Carte géomorphologique des îles de Tahiti et Moorea (Atlas ORSTOM, 1993).

4.3.5. Facteurs anthropiques

La démographie et le développement de l'île de Tahiti entraînent depuis plusieurs décennies, dès 1974 (cf. biblio. [1]), un très fort développement urbain qui conduit à une déforestation et à une multiplication des terrassements en vue de constructions de voiries et habitations (Figure 25).

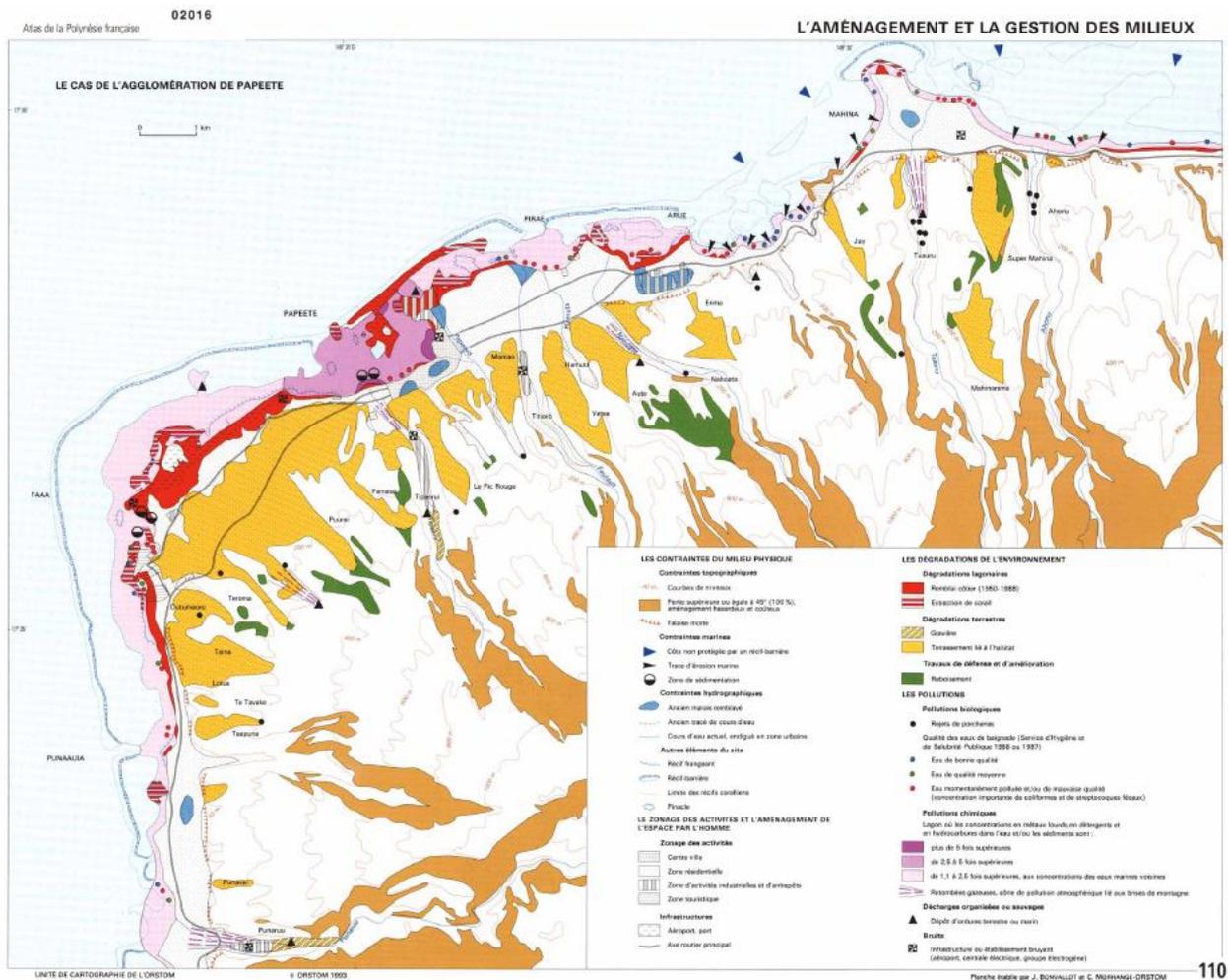


Figure 25 - Exemple de contraintes d'aménagements (terrassements) pouvant influencer sur l'érosion à proximité de Papeete (Atlas ORSTOM 1993).

Dans les zones escarpées, les précipitations importantes entraînent une érosion accélérée des terrassements et/ou talus non protégés, ce qui dégrade leur tenue mécanique (ravinement, écoulement...) jusqu'à entraîner des instabilités profondes. Durant le programme ARAI 2, une étude sur l'érodabilité des talus anthropiques en Polynésie française a été menée par le BRGM en 2010 (rapport BRGM/RP-58965-FR, 10/2010). Cette étude a conclu à une érosion annuelle probable de ces talus comprise entre 5 et 55 mm par an avec une valeur moyenne annuelle de 22 mm/an.

4.4. LES DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE TEMPS DES PHÉNOMÈNES D'ÉROSION

La morphologie d'ensemble des cours d'eau et la formation des reliefs sont en partie dues à des phénomènes d'érosion. Ces changements interviennent à l'échelle des temps géologiques. On peut qualifier ces processus de « lents ».

Les adaptations morphologiques du lit des rivières aux activités anthropiques (aménagement des cours d'eau, extractions de matériaux) sont visibles à l'échelle de quelques décennies, c'est-à-dire à l'échelle d'une vie humaine. Par opposition à l'échelle de temps précédente, on parlera de processus « rapides ».

Il convient donc, avant toute étude approfondie des phénomènes d'érosion, de les replacer dans leur échelle de temps propre.

À titre d'exemple, on citera un article de 2007 présentant les résultats d'une étude géomorphologique (cf. biblio [3]), réalisée sur 27 bassins versants de Tahiti, qui fait état d'une érosion moyenne, à l'échelle de centaines de milliers d'années, comprise entre 1 000 m³ et plus de 2 500 m³ par an et par km².

4.5. QUANTIFICATION DE L'ÉROSION DES SOLS À TAHITI

Peu de mesures ou de tentatives de quantification de l'érosion des sols concernent à ce jour les îles de la Polynésie.

En 1974, deux parcelles de 100 m² ont été installées à Faaa à des altitudes de 230 m et de 700 m, afin de réaliser des mesures d'érosion (cf. biblio [1]). Ces parcelles, installées sur des sols ferrallitiques argileux, exploitées pendant un mois, ont conduit à une estimation de l'érosion de :

- 15,25 T/ha à 230 m d'altitude, pour un total pluviométrique de 272 mm ;
- 34,15 T/ha à 700 m d'altitude, pour un total pluviométrique de 423 mm.

En 1996-1997, trois petits bassins versants de Tahiti ont été suivis afin d'évaluer l'impact de l'urbanisation sur la charge solide et organique des eaux (cf. biblio [2]). Avec des évaluations d'érosion comprises entre 60 T/km²/an (bassin versant naturel de forêt) et 710 T/km²/an (bassin versant avec influence anthropique), l'auteur concluait à une forte influence anthropique et estimait les flux de transport à :

- 280 T/km²/an en milieu naturel ;
- 7300 T/km²/an sur les zones en cours d'urbanisation.

Enfin, récemment, dans un article réalisé dans le cadre d'une thèse (cf. biblio [4]), une évaluation de l'érosion des sols a été conduite au moyen du modèle de Wischmeier (Figure 26).

Le modèle de Wischmeier et Smith (USLE) est composé de cinq sous modèles (5 facteurs), la définition de chacun des facteurs étant en soi un sous modèle. L'évaluation de l'érosion se fait par multiplication de ces 5 facteurs qui sont définis comme suit :

- l'érosivité de la pluie : la détermination de ce facteur nécessite l'étude des différentes averses ;
- l'érodabilité des sols (variable entre 0,01 et 0,7) ;
- la topographie (variable entre 0,1 et 5) ;

- le couvert végétal (variable entre 0,001 et 1) ;
- et enfin, l'existence ou non de pratiques antiérosives (variable entre 0,1 et 1).

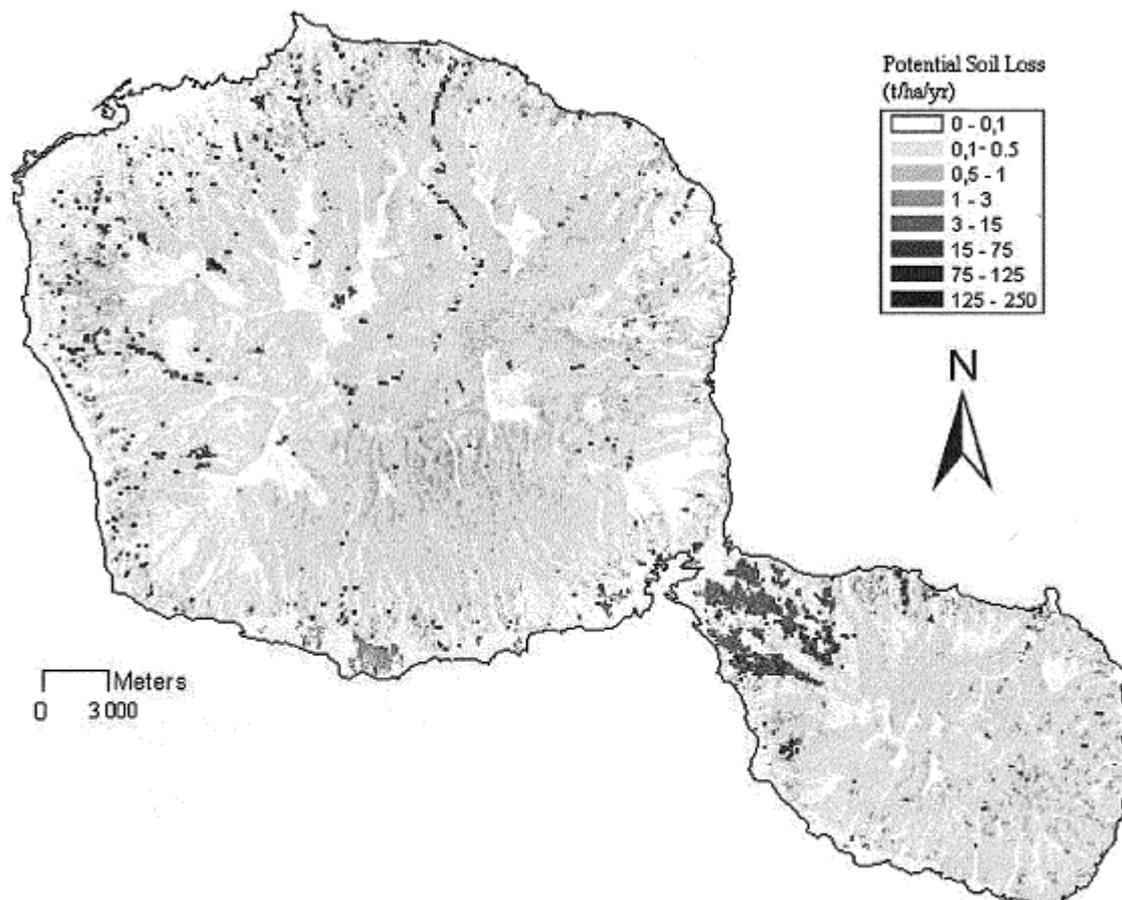


Figure 26 - Évaluation de l'érosion des sols de Tahiti à l'aide d'un modèle de Wischmeier (Fengyin Ye et al., 2009).

Toutefois, ce modèle ne fournit qu'une évaluation de l'érosion moyenne (sur 20 ans) en nappe et n'a été développé que pour les pénélaines et collines américaines (pente des versants comprise entre 1 et 20 %). Il paraît donc inadapté en l'état à certaines îles de Polynésie. Seules des mesures expérimentales permettraient de le recaler.

4.6. SYNTHÈSE

Ainsi, le transport solide responsable des perturbations de l'équilibre morphologique peut être d'origine naturelle (mouvements de terrain de grande ampleur qui apportent des matériaux) ou anthropique (aménagement des rivières)

En conclusion, l'érosion des sols en bassin versant montagneux a des causes multiples, se manifeste par des processus différents et est favorisée ou non par la géologie, le climat, la géomorphologie, le couvert végétal... Les processus érosifs ont

soit une action de constitution d'un stock de matériaux, soit une action de mobilisation des matériaux. Les facteurs de l'érosion des versants sont favorables ou contraires à l'érosion. Par exemple, nous avons montré que le couvert forestier joue un rôle important dans l'écoulement des eaux de pluies en absorbant le ruissellement et en réduisant la vitesse du courant. En montagne, la quantification de l'érosion nécessite la mise au point d'une méthode spécifique. Celle-ci peut se baser sur des modèles empiriques ou conceptuels, sur la typologie des processus, sur l'analyse des données historiques... L'ambition de ses approches doit en général se restreindre à une évaluation globale de la production de matériaux, tous processus confondus.

Nous venons de présenter les problématiques d'érosion et d'apports de matériaux aux rivières sur l'île de Tahiti. L'inventaire de ces cartes et données laisse entrevoir la possibilité technique de réaliser une carte de sensibilité à l'érosion à l'échelle de l'île, qui permettra de donner un aperçu global important pour hiérarchiser les priorités. Pour cela, il a été mis en évidence que seules des mesures expérimentales permettraient de recalibrer des modèles de mesures de l'érosion des sols à l'échelle de l'île.

5. Comment quantifier le transport solide d'une rivière torrentielle

Le développement des connaissances concernant le transport solide devrait permettre de définir des mesures adéquates susceptibles de réduire les deux enjeux les plus significatifs en Polynésie : les risques d'inondations et de pollution des lagons.

La quantification des apports solides d'une rivière passe par la connaissance du fonctionnement du bassin versant, en temps normal et en cas de crise. Les outils mathématiques développés pour quantifier le transport solide doivent être calés le plus possible sur la réalité par des mesures et des observations de terrain. Le caractère spécifique des phénomènes d'érosion de montagne, de l'hydraulique torrentielle et des mécanismes de charriage nécessite une validation des formules et des modèles utilisées. Cette validation ne peut se faire qu'avec des mesures et des observations de terrain qui, complétées par les modélisations physiques en laboratoire, permettront d'obtenir des outils mathématiques robustes pour quantifier le transport solide.

Afin de traiter cette problématique, il apparaît donc nécessaire de chercher à mieux connaître et quantifier :

- les apports de matériaux pour cerner les principales zones contributrices à l'érosion ;
- les débits liquides des principaux cours d'eau ;
- les capacités de transport, tant en charriage qu'en suspension, des principaux cours d'eau.

L'objet de ce chapitre est de dresser un état des lieux (non exhaustif) des méthodes et outils disponibles pour apprécier chacune des grandeurs précitées. Les techniques de mesures ponctuelles et celles de suivi du transport solide seront également présentées.

5.1. LA PRODUCTION DE MATÉRIAUX ÉRODÉS

Actuellement, à notre connaissance, il n'existe aucune étude quantitative de ce type en Polynésie française.

5.1.1. L'estimation des apports des versants

La production de matériaux des versants mis à disposition du torrent est extrêmement difficile à quantifier car les mesures sont rares et la connaissance sur les mécanismes est peu développée. Deux cas sont possibles :

- si l'on dispose de mesures réalisées sur des bassins versants expérimentaux, on peut, en extrapolant ces valeurs, régionaliser ces mesures à la zone d'étude. Cette méthode nécessite toutefois une mise au point et une validation des résultats ;
- si l'on ne dispose pas de résultats sur bassins versants expérimentaux, la méthodologie suivante peut être adoptée (Brochot *et al.*, 1998) :
 1. cartographier les unités homogènes concernant les processus érosifs, soit directement en cartographiant les faciès érosifs, soit indirectement par photo-interprétation complétée par des relevés de terrains.
 2. attribuer à chaque unité un apport de matériaux pour un événement considéré pour estimer les apports de versants qui seront mis à disposition du torrent. On estime ainsi l'ablation du bassin versant. Au cours du cheminement, une partie des matériaux érodés est filtrée par la végétation ou se dépose sur des replats. L'ensemble des matériaux érodés sur un bassin versant ne sera donc pas immédiatement mis à disposition des torrents.
 3. compte tenu de la forte incertitude de ces estimations, il est nécessaire de valider ces estimations à partir d'évènements historiques bien connus.

Brochot (1993) a appliqué cette démarche méthodologique à un bassin versant des Pyrénées orientales et a validé les hypothèses de quantification à partir de la crue d'octobre 1940. L'auteur a ainsi quantifié les apports des versants et a mis en évidence qu'ils étaient en général largement supérieurs à la capacité de transport solide des torrents, estimée par des calculs hydrauliques.

La principale limite de cette méthode est qu'il est assez rare, sauf cas particulier, de pouvoir valider les apports des versants indépendamment du transport solide car les volumes de dépôts, principales données disponibles, sont connus au niveau des lits des torrents. Néanmoins, il est possible de valider les estimations en utilisant les modèles globaux de production de sédiments qui sont décrits dans le paragraphe suivant.

5.1.2. L'estimation de la production de sédiments

Des apports de versant à la production de sédiments

Les apports des versants ne sont pas forcément équivalents à l'ablation totale des terrains en raison d'une possible rétention des matériaux sur les versants (effet de seuil, de stockage).

De même, la production de sédiments est rarement équivalente (en quantité et en qualité) à la totalité des apports des versants, car les modalités du transport solide conduisent à des dépôts et des reprises de matériaux dans les lits et à des variations qualitatives.

Une fraction très fine des sédiments fournis par les versants, maintenue toujours en suspension, ne se déposera plus avant d'arriver jusqu'à la mer. Sa connaissance est souvent nécessaire, bien qu'elle ne joue aucun rôle dans la morphologie des lits, car

elle peut représenter des flux de matériaux considérables qui doivent être soustraits des apports de versants dans la plupart des raisonnements d'ingénierie. Meunier (1999) propose la règle pratique suivante : « *on compare la taille du matériau du lit (mesurée forcément en dehors des crues) et celle du matériau issu des versants : le matériau de lessivage est le matériau présent dans la courbe granulométrique des zones érodées des versants et absent ou très peu présent dans la courbe granulométrique des matériaux du lit. Ce critère est également proposé pour les cours d'eau à faible pente* ».

Cette méthode a permis de déterminer, sur les torrents du Nord-Ouest de la Martinique, que le diamètre des matériaux de lessivage est de l'ordre de **1 à 5 mm**, ce qui correspond approximativement au d_{10} de la courbe granulométrique des matériaux du lit (Meunier, 1999). L'auteur ajoute que cette valeur de diamètre peut être doublée pour tenir compte de la faible densité des matériaux ponceux transportés.

Les modèles globaux de production de sédiment

Les modèles globaux de production de sédiments sont des modèles statistiques ou conceptuels, reliant la production de sédiments à des caractéristiques du bassin versant, sans passer par l'étape intermédiaire de l'estimation des apports des versants. Ils ont été établis à partir de données de volumes recueillies sur le terrain après des évènements.

Pour des évènements catastrophiques et des bassins versants de moins de 80 km², Kronfellner-Krauss (cité dans Brochot *et al.*, 1998) a proposé le modèle suivant :

$$V = KSJ$$

- K variant de 500 à 1 500 ;
- S : surface en km² ;
- J : pente moyenne de l'ensemble du lit en % ;
- V : volume de matériaux produit en m³.

D'Agostino *et al.* (1996), s'appuyant sur le modèle de Kronfellner-Krauss, ont affiné la détermination du coefficient K à partir d'évènements dans le Trentin oriental. Les auteurs introduisent des indices géologiques IG (variant de 0 à 5) et de transport IT (variant de 1 à 3) et obtiennent :

$$V = 39SJ^{1.5}IGIT^{-0.3}$$

- S : surface du bassin versant en km² ;
- J : pente moyenne de l'ensemble du lit en % ;
- IG : indice géologique variant de 0 à 5 ;
- IT : indice de transport variant de 1 à 3 ;
- V : volume de matériaux produits en m³.

En conclusion, ce type de modèle peut être utile pour des études régionales, pour valider des estimations de production de matériaux à l'échelle d'un bassin versant, et pour des dégrossissages. Leur robustesse et leur précision peut être améliorée notamment en intégrant mieux des critères géomorphologiques.

Les modèles globaux spatialisés

Dans ce paragraphe, nous nous intéresserons au modèle ETC (Érosion des Torrents en Crue) qui est un modèle développé depuis maintenant une dizaine d'année par le CEMAGREF. Cet outil est un modèle global spatialisé, composé de divers modules traitant l'ensemble des problèmes inhérents à l'érosion torrentielle (pluie, apports des versants, transport solide dans le lit des torrents).

Le modèle ETC se situe à une échelle intermédiaire de modélisation :

- plus fine que les modèles de production de sédiments opérant au niveau des bassins versants dans leur globalité ;
- plus grossière que les modèles physiques de transport solide qui ne seraient pas pertinents pour les versants, compte tenu de la complexité des processus qui s'exercent à des échelles de temps et d'espace très variables.

ETC considère un bassin versant comme un assemblage de sous-bassins versants et de biefs (sections et lits). Une structure arborescente relie les deux types d'entités (Figure 27).

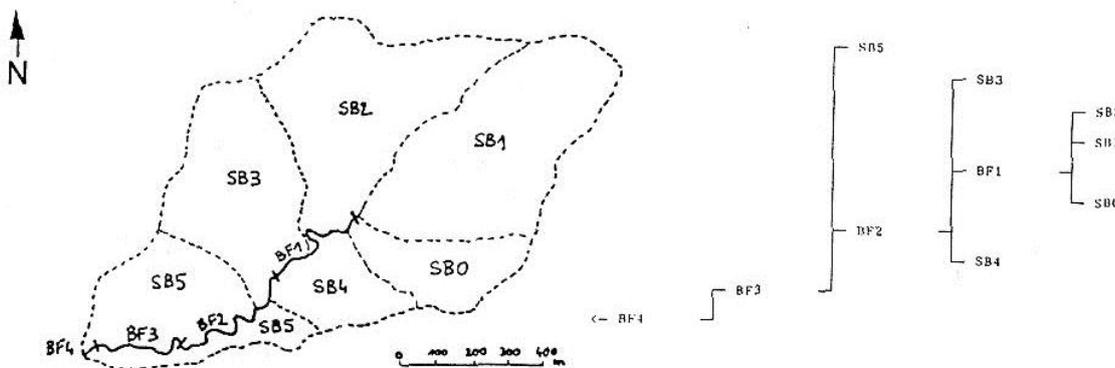


Figure 27 - Exemple de structure arborescente pour la représentation d'un bassin versant dans le modèle ETC du Cemagref (Brochot, 1998).

Les entités doivent posséder des caractéristiques physiques uniformes car ce sont les valeurs moyennes qui seront utilisées comme paramètres, puisque ETC est un modèle global. Le recours à la spatialisé permet toutefois de prendre en compte d'éventuelles hétérogénéités à l'échelle du bassin versant. Les pluies peuvent être également spatialisées à la même échelle que les versants.

Des modèles pluie-débit et pluie-érosion sont appliqués sur les sous-bassins versants, ce qui permet d'avoir en sortie de chacun un débit liquide et une quantité de matériau associée.

Ce modèle ainsi décrit est plus pertinent que les modèles globaux dans l'estimation des apports de matériaux par les versants. Il permet également, sous certaines conditions, de calculer les débits liquides et solides à l'exutoire du bassin versant.

5.2. L'ESTIMATION DES DÉBITS LIQUIDES

L'estimation des débits liquides est un des paramètres permettant d'apprécier le transport de solides, puisque nous avons vu qu'il existe un seuil de débit à partir duquel les matériaux du lit se mettent en mouvement. Ce débit critique d'entraînement varie suivant les conditions dans lesquelles la crue se met en place.

De nombreuses formules existent, qui tiennent compte des spécificités de l'hydraulique torrentielle, et qui permettent d'estimer la vitesse de l'écoulement torrentiel. Elles sont présentées en détail en Annexe 5.

Ces formules sont tirées d'essais sur modèles réduits physiques avec transport solide et donnent, selon Meunier (1991), des vitesses supérieures aux vitesses constatées sans transport solide, sans que l'on puisse être sûr que l'écart ne provienne pas de la différence entre les protocoles de mesure. De manière générale, les formules présentées dans ce chapitre, si l'on exclut la formule de Manning Strickler sous sa forme classique de l'hydraulique fluviale, donne des résultats convergents. De nombreux auteurs insistent sur la nécessité de confronter ces formules à des validations et des mesures de terrain.

5.3. L'ESTIMATION DES DÉBITS SOLIDES

La granulométrie des matériaux transportés intervient dans la formulation des lois de pertes de charge et, naturellement, dans les formules de calcul de la capacité de transport. Ce chapitre traite des méthodes d'évaluation de la granulométrie des lits des cours d'eau.

5.3.1. Seuils de début d'entraînement et capacité maximale de transport

Les formules analytiques d'estimation des seuils de début d'entraînement et de capacité maximale de transport sont explicitées en Annexe 2.

5.3.2. La granulométrie des lits des cours d'eau

Il existe de nombreuses méthodes permettant de déterminer les courbes granulométriques des lits des cours d'eau ; celles-ci sont utilisées aussi bien à des fins qualitatives (morphologie des cours d'eau) que quantitatives (calculs hydrauliques).

Contexte

La connaissance de la granulométrie des éléments qui composent les lits des cours d'eau est importante dans la résolution des problèmes de dynamique torrentielle. Elle

intervient par exemple dans la détermination du coefficient de rugosité et dans l'estimation de la contrainte critique (ou débit critique) de cisaillement.

La courbe granulométrique d'un matériau est obtenue par tamisage et pesage, la fréquence cumulée étant donnée par le rapport du poids cumulé au poids total de l'échantillon. On conçoit que cette méthode est pratique et adaptée au cas de matériaux fins (sables par exemple) mais, lorsque l'on veut caractériser la granulométrie d'un lit naturel, plusieurs problèmes d'ordre méthodologique apparaissent :

- la représentativité des points de mesure qui ne traduisent qu'une part limitée de l'espace ;
- le bienfondé d'une prise d'échantillon volumique par rapport à un échantillon surfacique ;
- la prise en compte des éléments très gros qui se trouvent dans le lit ;
- des problèmes matériels pour les mesures *in situ*.

De nombreux auteurs ont imaginé des méthodes différentes de caractérisation de la granulométrie et il s'agit donc, si l'on veut réutiliser des résultats antérieurs, de bien connaître leurs procédés d'obtention. Ce paragraphe s'attache aux conditions pratiques de trois méthodes d'appréciation de la granulométrie des lits des cours d'eau.

Le choix de la zone à échantillonner

La manière d'aborder ce problème dépend du but poursuivi : si l'on souhaite caractériser une zone donnée par une grandeur quantifiée, ou si l'on souhaite comparer des zones entre elles.

La première étape consiste à faire un zonage des secteurs considérés *a priori* comme homogènes du point de vue de la granulométrie. Cette étape peut nécessiter une sélection préliminaire des méthodes de mesures à mettre en œuvre (par exemple sur la séparation ou non des granulométries de surface et de profondeur).

Puis, dans une zone homogène, il s'agit de regarder la part de l'espace occupé par les gros éléments, que l'on peut répartir en classes, afin de calculer grossièrement leur taux d'occupation surfacique.

On peut ensuite tenir compte dans les calculs de l'existence des classes non prises en compte (Figure 28).

Taille des classes (cm)	Surface approchée de éléments de la classe i	Taux d'occupation surfacique	
	A_i	$b_{i,s} = \frac{A_i}{S}$	Eléments de taille supérieure à 50 cm
50-60	A_1	$b_{1,s} = A_1/S$	
Total	$\sum_i A_i$	$F = \sum_i b_{i,s} = \frac{\sum_i A_i}{S}$	
	Nombre de fois où un élément de la classe j est échantillonné	Taux d'occupation linéique	
40-50	n_1	$b_{1,l} = \frac{n_1(1-F)}{N}$	Eléments de taille inférieure à 50 cm
1-2.5	n_2	$b_{2,l} = \frac{n_2(1-F)}{N}$	
< 1	n_d	$b_{d,l} = \frac{n_d(1-F)}{N}$	
Total	$N = \sum_j n_j$	$\sum_j b_{j,l} = 1 - F$	

Figure 28 - Tableau de comptage et taux d'occupation surfacique des classes d'éléments (Meunier et al., 1987).

Les méthodes utilisables en pratique

Nous présenterons ici trois méthodes qui ont été retenues par Meunier et Carion (1987) pour leur mise en œuvre pratique (Tableau 2) :

- la méthode des tamis ;
- la méthode de la mesure des traversées sur photographies ;
- la méthode d'échantillonnage *in situ*.

Leur mise en œuvre diffère et l'on choisira la méthode la plus adaptée au cas d'étude (Tableau 2).

Conclusion

Il existe deux grandes classes de méthodes, qui diffèrent par leur principe :

- les méthodes de mesure systématique, où la fréquence utilisée est une fréquence en mesure ;
- les méthodes par échantillonnage où la fréquence utilisée est une fréquence en nombre.

Les principes de base permettant de comparer ces méthodes sont les suivantes :

- équivalence des taux d'occupation linéique, surfacique, et volumique ;
- équivalence des fréquences en nombre et en mesure, dès lors que la fréquence en nombre caractérise l'occupation de l'espace par les éléments et non les éléments eux-mêmes.

	Méthode des tamis	Méthode de la mesure des traversées sur photo	Méthodes d'échantillonnage <i>in situ</i>
Obtention des éléments à mesurer	Prise en compte systématique de tous les éléments d'un volume	Prise en compte systématique des longueurs de traversée sur des transects tracés sur photo	Par échantillonnage au hasard sur le site de mesures. Le nombre total de tirage représente l'étendue (qui peut être surfacique ou linéique) du site de mesure ;
Grandeur à mesurer	Le poids par classe d'éléments	La longueur des traversées	Le taux d'occupation spatiale (surfacique ou linéique suivant le protocole d'échantillonnage adopté)
Taille caractéristique à mesurer	La maille du tamis supérieure	La longueur de traversées	Le plus simple est de prendre le diamètre intermédiaire
Fréquence	Fréquence en mesure cumulée sur les poids	Fréquence en mesure sur les longueurs de traversée	Fréquence en nombre
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode de référence ; - Facile à mettre en œuvre en laboratoire ; - Cohérence avec les analyses sédimentologiques ; - Prise en compte de tous les éléments (donc pas de part subjective de l'opérateur) 	<ul style="list-style-type: none"> - Rend compte seulement de la surface (utile pour la rugosité de surface et le pavage) ; - Facile d'emploi donc peut être répétée facilement ; - Pas de saisie de données sur le terrain. Seule la photo est à faire, le dépouillement se fait au bureau et peut être automatisé ; - Zone de mesures limitée : donc permet l'analyse de phénomène à gradient spatial important : zone d'arrêt d'une lave torrentielle par exemple ; - Doit pouvoir s'utiliser dans certains cas pour déterminer la granulométrie du lit effectif du cours d'eau (photo sous l'eau). 	<ul style="list-style-type: none"> - Très simple d'emploi. peut-être répété facilement ; - Nécessitent pas ou peu de matériel ; - Rendent compte seulement de la surface (donc intéressant pour étudier les problèmes de rugosité et de pavage) ; - On peut prendre en compte une zone de mesure très vaste (donc intéressant pour les rivières quand on veut avoir une mesure globale).
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite du matériel (tamis + balance) ; - Lourde à mettre en œuvre sur le terrain ; - Prise en compte aveugle de tout le volume de mesures (caractérisation du pavage difficile, liaison avec la rugosité de surface problématique) ; - Zone de mesure forcément limitée ; - Selon le type de problème étudié, un traitement particulier de la classe des éléments fins doit être effectué. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite du matériel (appareil photo plus pied) ; - Zone de mesure limitée (un inconvénient surtout pour les rivières, pas forcément pour les torrents) ; - Effet de masque ; - Selon le type de problème étudié, un traitement particulier de la classe des éléments fins doit être effectué ; - Rend compte seulement de la surface (donc problématique pour ce qui concerne le transport solide). 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque de subjectivité dans le choix de l'élément à prendre en compte à chaque tirage ; le choix de la méthodologie de tirage est important ; - Le contrôle des résultats par tests statistiques s'impose absolument ; - Les résultats obtenus par des observateurs différents ne sont pas comparables sans précaution. - Rendent compte seulement de la surface (donc ne rendent pas compte des couches profondes qui peuvent influencer le transport solide) ; - Saisie de données à faire sur le terrain ; - Selon le type de problème étudié, un traitement particulier de la classe des éléments fins doit être effectué ; - Peuvent être délicates d'emploi dans les zones limitées, car le prélèvement des éléments déstructure leur agencement et peut modifier le résultat des tirages si le pas d'espace est trop petit.

Comparaison entre ces trois méthodes

Si ces trois méthodes sont correctement conduites, leurs résultats ne doivent différer que sur un point : le problème des éléments fins qui est traité en prenant la masse des éléments fins pour la méthode des tamis, et le volume qu'ils occupent dans l'espace pour les deux autres.

Tableau 1 - Description de méthodes de détermination de la courbe granulométrique. Avantages et inconvénients.

Il s'en déduit les règles pratiques suivantes :

- pour que des méthodes soient équivalentes entre elles (et à la méthode des tamis, hormis la classe des éléments fins), il faut que le nombre de dimensions de la grandeur à mesurer soit égal à celui du masque de mesures ;
- pour les méthodes par échantillonnage ; il faut compter le même élément autant de fois qu'il est échantillonné.

Entre toutes les méthodes qui sont basées sur des taux d'occupation spatiale (quelles qu'elles soient), et la méthode des tamis, qui est la seule à être basée sur des mesures de poids, on n'obtient l'équivalence qu'en corrigeant la correspondance poids-volume pour la classe des éléments fins, si elle existe, en faisant intervenir soit la porosité soit la densité apparente.

Trois méthodes se dégagent en pratique, la méthode des tamis, la méthode de mesure des longueurs de traversée sur photos, qui sont des méthodes de mesures systématiques, et les méthodes d'échantillonnage *in situ*. Quel que soit la méthode utilisée, l'analyse statistique des résultats s'impose, spécialement quand ils sont utilisées à des fins comparatives.

Il est difficile de déterminer sur un cours d'eau une granulométrie unique de référence, on devra le plus souvent se contenter d'une gamme de granulométrie, laquelle est un des paramètres à prendre en compte dans les calculs de transport solide.

5.4. LES TECHNIQUES DE MESURE DE LA CHARGE DES RIVIÈRES

Nous passons ici en revue les principales méthodes permettant de mesurer la partie du flux sédimentaire transportée en **charge de fond** d'une rivière. Les îles de la Polynésie étant sujettes à l'érosion torrentielle, lors d'événements climatiques de type cyclonique, nous nous intéresserons particulièrement aux méthodes qu'il serait envisageable de mettre en œuvre dans un tel cadre, en particulier celles qui auront pu être validées en contexte montagneux. Les autres méthodes, classiques ou non, et s'appliquant plutôt à des sédiments moins grossiers (sables et graviers), seront néanmoins mentionnées.

Les principales caractéristiques des différentes méthodes de mesure de charge de fond sont résumées dans le Tableau 2 ci-après, sachant que chacune d'entre elles est détaillée en Annexe 6.

De manière générale, ces méthodes de mesure du transport de charge de fond sont souvent mises en œuvre à des fins de recherche fondamentale, à savoir la compréhension de phénomènes d'érosion fluviale, de la dynamique des rivières, ou l'établissement de formules empiriques (ou semi-empiriques) de transport de sédiment. L'aspect le plus appliqué de ce champ d'investigation est la mesure d'affouillement, développée par des ingénieurs s'interrogeant par exemple sur le devenir des piles d'un pont, ou par des scientifiques s'intéressant à l'étude des frayères.

La mesure du transport solide dans les rivières constitue un problème particulier. Étant donné le climat de l'île, l'érosion y est principalement torrentielle, et se produit surtout de manière très ponctuelle lors d'événements catastrophiques (cyclones). En conséquence, une grande partie du matériel transporté par les rivières l'est sous forme de charge de fond avec une granulométrie très variée. Les glissements de terrain en amont et les effondrements de berges alimentent les rivières en gros blocs qui peuvent être transportés tels quels lors de crues extrêmes.

Ce constat rend impossible la mise en place des dispositifs décrits, qui ne résisteraient pas à l'arrivée brutale de blocs pouvant atteindre la tonne (en de rares endroits et/ou circonstances). À la rigueur, le détecteur d'impacts proposé par Carling *et al.* (2002) supporterait peut-être le contexte, puisqu'il est présenté comme résistant au passage de blocs métriques. Cependant, il doit être fixé solidement à un lit rocheux, et ne fait que compter les particules qui le heurtent (l'interprétation en termes de *volume* transporté est loin d'être évidente).

Les techniques les plus simples sont donc sans doute les plus adaptées au contexte local. La première étape consiste à suivre la trace d'une ligne de blocs peints préalablement à une crue. Cette opération donnera une idée de la manière dont les cailloux sont chahutés lors des phases de transport. On pourrait, dans un second temps, avoir recours à des traceurs magnétiques, seul moyen d'espérer suivre les gros cailloux sans les perdre de vue. L'utilisation d'hydrophones constitue une piste ingénieuse, mais l'appareillage nécessaire risque de ne pas être assez robuste pour ne pas être détruit au passage des blocs.

Méthode	Limites			Grandeurs mesurées
	Taille de grains	Volume de mesure	Durée de mesure	
Échantillonneur :				
à filet	3 < D < 200 mm	0.01 m ³	1 h	volume, poids, taille, flux
Helley-Smith	0,25 < D < 150 mm	0,01-0,1 m ³	30 s à 3 mn	volume, poids, taille, flux
automatique à fente	D < 200 mm	< 1 m ³	mesure en continu	volume, poids, taille, flux
Acoustique	toutes tailles	-	mesure en continu	flux de particules
Magnétique				
traceurs	graviers, blocs	-	-	vitesse des particules
minéraux ferromagnétiques	toutes tailles	-	mesure en continu	flux de particules
Cailloux peints	galets, blocs	-	-	vitesse des particules
Radio traçage	galets (5-10 cm)	-	-	vitesse des particules
Détecteur d'impacts	toutes tailles	-	mesure en continu	flux de particules (nombre d'impacts limité à 3 coups.s ⁻¹)
Chaînes d'affouillement	-	-	1 événement érosif	épaisseur de la charge mobile (profondeur d'affouillement) pendant un événement

Tableau 2 - Résumé des principales caractéristiques des méthodes de mesure de charge sédimentaire de fond.

5.4.1. Méthodes et outils de suivi des volumes charriés : le diagnostic géomorphologique comme méthode d'analyse

Le diagnostic géomorphologique constitue une approche décisive pour ce qui est de la compréhension de la dynamique sédimentaire d'une rivière. Les étapes successives du diagnostic peuvent être synthétisées comme suit (Agence de l'eau RMC, 1999) :

- l'analyse des transformations et de la réponse du milieu, par tronçons homogènes ;
- la mise en évidence de la logique amont/aval ;
- la confrontation avec les enjeux ;
- l'analyse des points particuliers mis en évidence.

La méthodologie développée par le BRGM a fait l'objet de validations successives sur de nombreuses rivières métropolitaines et à la Réunion. L'objet de ce paragraphe est de détailler l'approche mise en œuvre, et d'exposer les rendus d'un tel diagnostic.

Méthodologie

La démarche suivie consiste en une analyse de l'évolution du lit de la rivière à partir de photographies aériennes IGN des années 1961, 1966, 1978, 1984, 1997 et 2002, afin de mettre en évidence les tendances d'évolution de la rivière sur le long terme. Cette approche a été accompagnée d'études de terrain afin de recueillir des éléments d'informations sur le lit actuel de la rivière, sur des éventuelles reliques d'alluvions plus anciennes et, enfin, d'analyser les relations entre les zones d'apports de matériaux (éboulis, glissements de terrain) et le comportement de la rivière. L'objectif a par ailleurs visé à définir les éventuelles zones d'atterrissement (dépôts), ainsi que les zones éventuelles en incision (érosion du lit).

Résultats

Les reconnaissances de terrain permettent l'élaboration d'une esquisse cartographique de la géomorphologie des formations superficielles. Sur cette carte figurent les principales observations effectuées sur le terrain et sur les photographies aériennes, entre autres la nature et la chronologie des formations relatives ainsi que les mécanismes d'apport et de transit de matériaux dans le lit et les berges.

L'ensemble des données recueillies est par ailleurs synthétisé sur un diagramme (Figure 29) dans l'objectif de donner une vue synoptique des différents processus ou facteurs agissant sur l'évolution du lit de la rivière.

5.4.2. Les outils de suivi

Le suivi photographique

Un suivi photographique d'un site sensible permettra d'accumuler des informations précieuses pour décider du traitement adéquat.

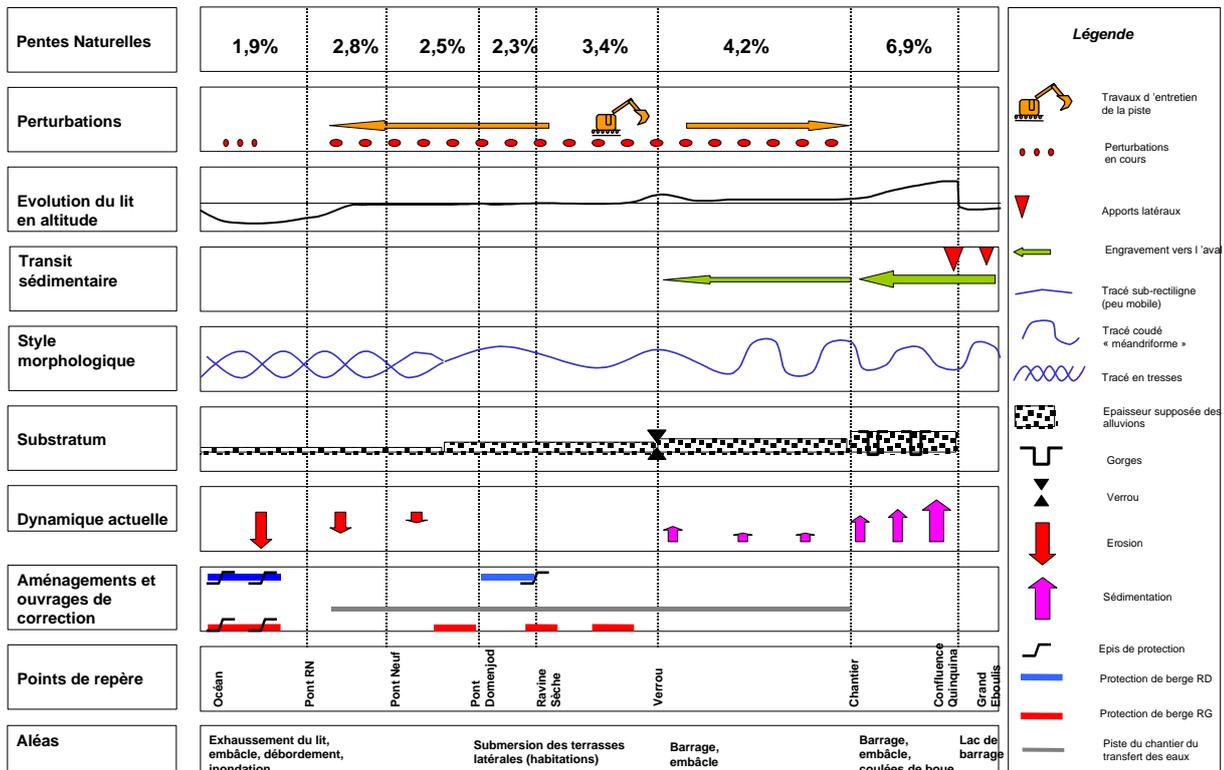


Figure 29 - Exemple de diagramme de synthèse du diagnostic géomorphologique sur la rivière des Pluies (BRGM, 2003).

Un suivi par photographies aériennes du lit d'un cours d'eau permet, avec les nouvelles techniques de photo-interprétation, de dégager l'évolution d'ensemble des dépôts de matériaux et de repérer le trajet des bancs de dépôts le long du cours d'eau. Ce type de suivi est particulièrement adapté au suivi de l'apport de matériaux par un éboulement, en amont du bassin versant. Un survol régulier permettra de suivre ces matériaux dans leur trajet amont aval, de quantifier leur vitesse de progression et donc d'appliquer une stratégie de gestion adéquate.

Le suivi topographique

Il constitue l'élément essentiel du suivi. Le suivi du profil en long de la ligne d'eau est le meilleur indicateur de l'évolution d'ensemble d'un tronçon à condition que les levés successifs soient réalisés à des débits comparables. La Figure 30 présente un exemple de tracé d'évolution du profil en long et une vue aérienne retraçant l'évolution de la localisation du lit mineur et des berges au droit d'un tronçon spécifique. Ces tracés peuvent permettre d'évaluer la tendance probable d'évolution et d'envisager, si besoin, la nécessité d'un ouvrage de protection tel que seuil (protection contre les affouillements d'ouvrage) ou protections latérales des berges.

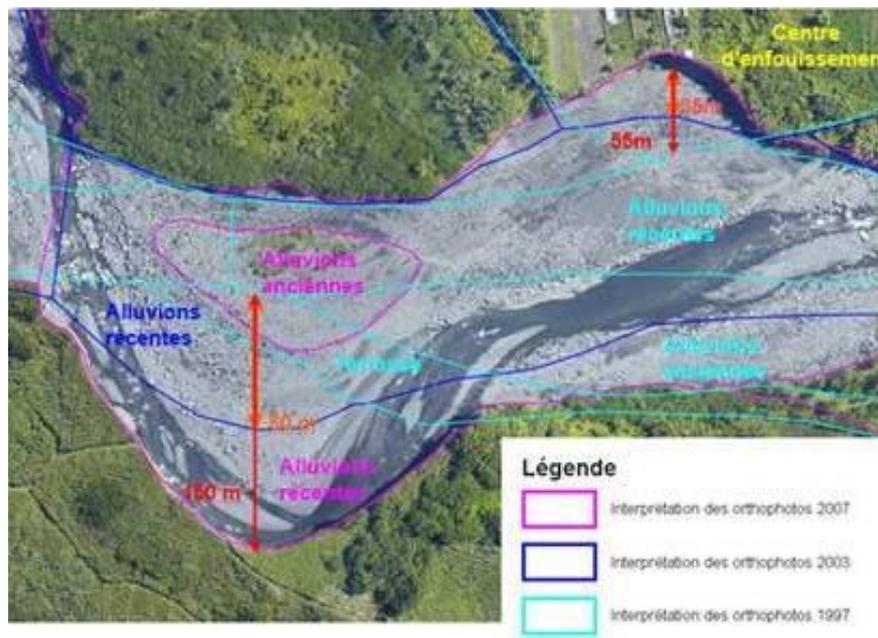
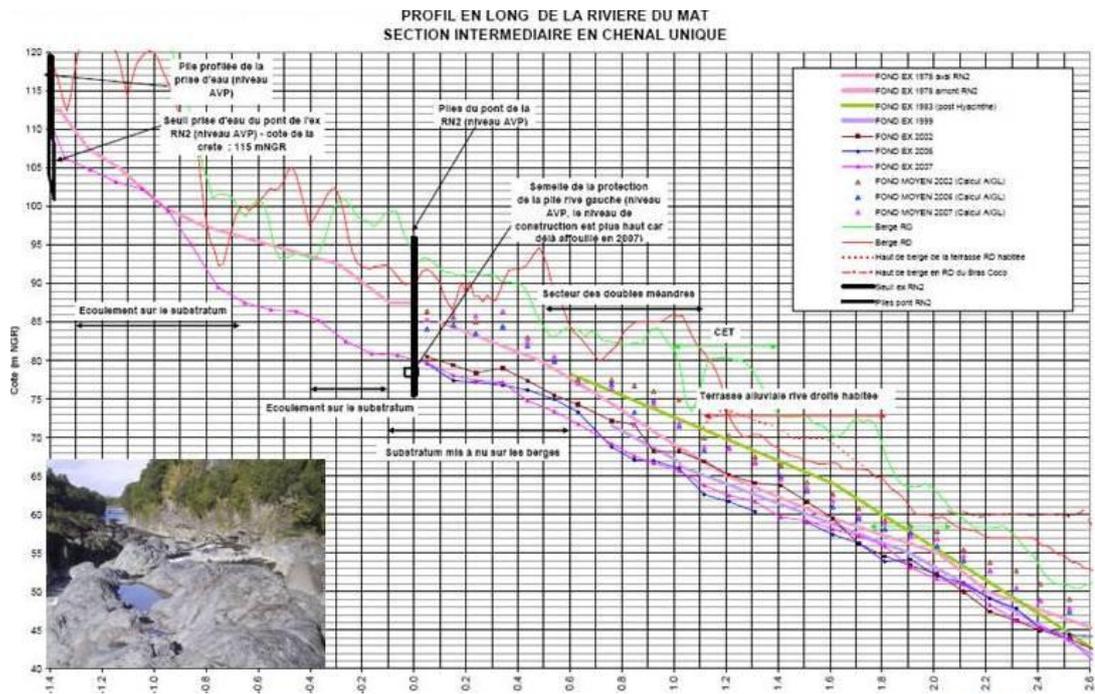


Figure 30 - Exemple de tracé d'évolution du profil en long et vue aérienne retraçant l'évolution de la localisation du lit mineur et des berges au droit d'un tronçon spécifique.

Le suivi des profils en travers peut également s'avérer utile pour visualiser l'évolution d'un banc, ou la réduction de la capacité du lit. Cependant, la comparaison des profils successifs doit être interprétée avec précaution :

- il importe de comparer non pas la cote de tel ou tel banc, mais d'analyser l'évolution du fond moyen du lit vif. Cette comparaison peut être rendue délicate si la largeur du lit vif a changé entre deux levés (végétalisation de bancs ou développement d'une anse d'érosion) ;
- l'évolution du lit au niveau du profil ne préjuge pas des évolutions en amont ou en aval.

Le guide méthodologique de l'Agence de l'Eau RMC (1999) propose comme principe de base un levé topographique tous les 5 ans, complété par un levé après chaque crue majeure. Il est rare en effet que des comparaisons sur un ou deux ans, en l'absence de grandes crues, mettent en évidence des évolutions significatives en regard des fluctuations normales, sauf en cas d'aménagement lourds.

Sur un tronçon, il peut être intéressant d'effectuer un bilan volumétrique sur une période donnée à partir de ces levés topographiques. En théorie, il est alors possible de cerner les apports naturels du tronçon, que l'on mettra en relation avec la capacité de transport calculée. Ce bilan s'exprime ainsi :

$$\text{Volume vers aval} = \text{apports amont} + \text{variations du lit} - \text{extractions}$$

avec :

- volume vers aval = volume ayant quitté le tronçon ;
- apports amont = apports solides en provenance du bassin versant ;
- variations du lit = volume libéré par l'abaissement du lit (et/ou piégé par l'exhaussement) ;
- prélèvements = volumes extraits.

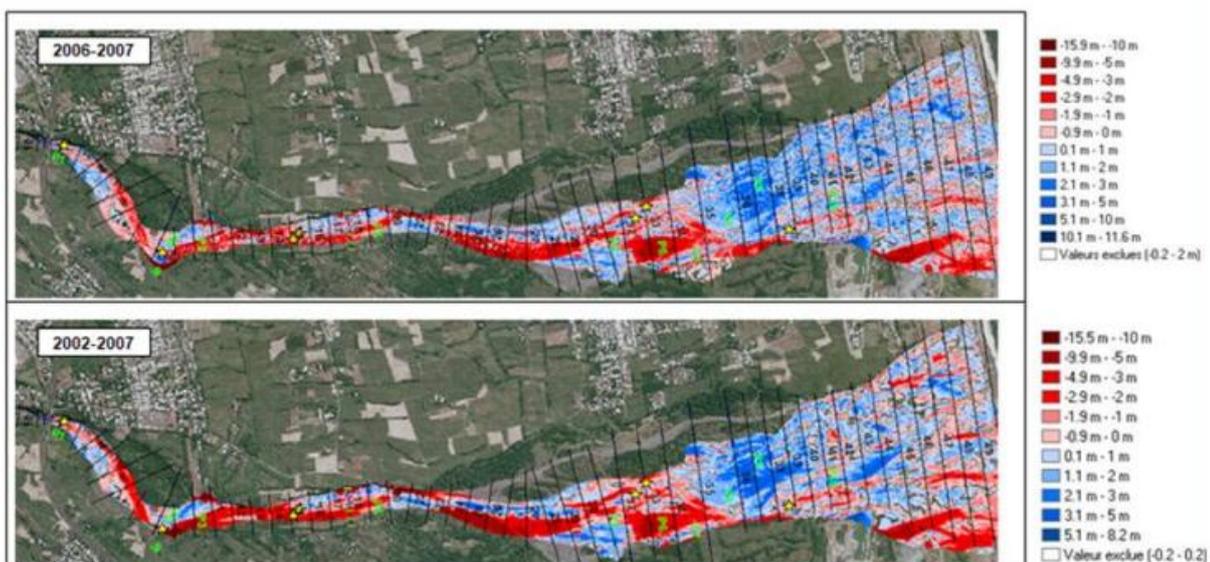


Figure 31 - Exemple d'évaluations des dépôts et affouillements réalisées entre deux dates au moyen de levés topographiques.

Ce type de bilan est plus particulièrement indiqué à l'amont d'une retenue où tout le transit a pu être piégé et ainsi être mesuré.

Le suivi de la granulométrie

Il paraît *a priori* séduisant de suivre la granulométrie des alluvions quand on s'attend à des évolutions (tendance au pavage, renouvellement des alluvions lors du rétablissement du transit des matériaux...). Cependant, la variabilité des alluvions à petite échelle est telle, qu'il sera le plus souvent impossible d'attribuer des écarts de mesure à une véritable évolution de la granulométrie du lit.

Pour tenter de déceler une véritable évolution, on prendra deux précautions :

- réaliser les mesures successives non pas à un endroit fixe, mais sur un même type de forme (seuils et tête de bancs sont les formes les plus adaptées pour un tel suivi) ;
- procéder à des mesures sur plusieurs stations voisines similaires, de manière à mieux distinguer les spécificités locales du contexte général de la zone d'étude.

Le suivi hydrométrique

Il paraît intéressant de mesurer, au terme de chaque année, quelle a été son efficacité morphologique. Cela permet d'interpréter les évolutions observées ou, au contraire, l'absence d'évolution. La stabilité du lit est-elle due à un déficit hydrologique ou a-t-elle des causes plus profondes ? La forte dynamique du lit observé n'est-elle pas simplement due à une succession d'années à forte hydraulité ?

La connaissance des débits moyens journaliers, et la possibilité de connaître les débits à un pas de temps plus faible, sont des informations de suivi du transport solide de premier plan. En outre, un suivi hydrométrique rigoureux permet de répondre aux questions précédentes.

L'estimation des débits de pointe à partir des mesures de hauteur d'eau induit souvent, pour les rivières torrentielles à fort charriage, des surestimations des débits liquides qui sont dues en particulier à une surestimation des vitesses d'écoulement. L'accès à des informations de vitesse peut permettre de vérifier la cohérence des débits liquides, et ainsi améliorer sensiblement les estimations de transport solides effectuées à l'aide des formules mathématiques présentées en annexes.

6. Préconisations opérationnelles en Polynésie française

6.1. AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES CONCERNANT LE TRANSPORT SOLIDE

Les déséquilibres entraînés par le transport solide sur le milieu et sa gestion ont été décrits dans le chapitre 3. Prévenir et corriger ces déséquilibres nécessite de comprendre le fonctionnement global du bassin versant en temps normal et en cas de crise, et d'être capable de connaître puis quantifier les apports de matériaux, à l'origine du phénomène de transport.

Les formules ou modèles d'estimation des apports (par exemple le modèle USLE dit « de Wischmeier »), des débits liquides (crues) et des transports solides (formules empiriques) existants sont essentiellement déterminés pour des climats et reliefs très différents et paraissent donc inadaptés dans l'état, au contexte polynésien. Il apparaît ainsi fortement souhaitable de confronter ces modèles avec des mesures et des observations de terrains, pour vérifier dans un premier temps leur pertinence et, dans l'affirmative, les caler avec des données spécifiques.

L'inventaire des cartes, détaillé au chapitre 4, laisse entrevoir la possibilité technique de réaliser une carte de sensibilité à l'érosion à l'échelle de l'île. Ceci permettra de donner un premier aperçu global, afin de hiérarchiser les priorités. Pour cela, il a été mis en évidence que seules des mesures expérimentales permettraient de recalibrer des modèles de mesures de l'érosion des sols à l'échelle de l'île.

Afin de traiter cette problématique, il apparaît donc nécessaire de :

- cerner les principales zones contributrices à l'érosion et aux glissements de terrain ;
- quantifier les apports solides potentiels de ces zones ;
- quantifier les capacités de transports, tant en charriage qu'en suspension, des principaux cours d'eau situés en amont des principaux enjeux (urbanisations et lagons).

À partir du constat de l'existant en Polynésie française, plusieurs opérations importantes pourraient être envisagées :

- localiser les zones préférentielles d'érosion et/ou de glissement de terrain ;
- maintenir, voire, développer les stations hydrométriques permettant la connaissance des débits liquides, et améliorer ainsi la précision dans l'estimation des débits et volume de crue ;
- équiper les principales stations hydrométriques, situées en amont des lagons sur la plaine côtière, de préleveurs automatiques ou, pour le moins, la réalisation de

prélèvements, afin de préciser les volumes de sédiments en suspension susceptibles d'atteindre le lagon ;

- envisager la mise en place de moyens de mesure ou d'évaluation des sédiments charriés en installant des équipements tels que ceux listés dans ce rapport ou par des campagnes topographiques régulières. Ces méthodes sont détaillées dans le chapitre 5. Il s'agit ici de localiser les zones de dépôts et, s'il y a lieu, de les entretenir par des opérations de recalibrage ou de dragage ;
- sur la base de ces nouvelles connaissances, choisir, suivant les îles, les formules de calcul les plus adaptées.

6.2. RISQUE LIÉ AU RÉGIME TORRENTIEL DES RIVIÈRES

6.2.1. Risque de débordement sur les cônes de déjection

La principale menace causée par les rivières torrentielles est le risque de débordement sur les cônes de déjection qui sont le plus souvent urbanisés. De ce fait, la plupart des projets d'ingénierie visent à étudier les désordres potentiels que peuvent causer les rivières sur les cônes de déjection, et les moyens de s'en protéger. Il faut cependant noter qu'il y a très peu de cône de déjection réellement formé en Polynésie, et aucun à Tahiti sur des cours d'eau importants. Le risque, tout en étant réel, est de ce fait réduit à l'apparition de dépôt favorisant les débordements au droit des ruptures de pente à l'entrée des plaines côtières.

La logique des études suit à peu près celle pratiquée en hydraulique d'eau claire, tout en intégrant des contraintes nouvelles liées aux transports solides. De manière générale, dans l'étude du fonctionnement d'un torrent, la première étape consiste à déterminer le type de transport solide prédominant, le plus fréquent ou le plus dommageable. Cela se fait classiquement par l'étude des évènements passés, ainsi que par une analyse morphologique et hydrologique du site (Schrefler, 2001). Le risque étant défini, on utilise des méthodes adaptées aux conditions d'écoulement pour quantifier le phénomène.

6.2.2. Les stratégies de protection torrentielle

Il existe plusieurs stratégies de protection torrentielle. Les deux critères de classification sont (Schrefler, 2001) :

- l'existence ou non d'une intervention humaine (défense permanente réalisée sans intervention et défense temporaire fondée sur une prise de décision) ;
- le point d'intervention (défense active dans la zone de départ et défense passive sur le cône de déjection ou au droit de la zone d'atterrissement).

Le tableau 4 offre un récapitulatif sommaire des avantages et inconvénients de chaque stratégie. La stratégie de défense permanente met en œuvre des techniques opérationnelles sans intervention humaine. On recherche une protection par des ouvrages fixes et pérennes.

La défense permanente passive

Elle consiste à lutter contre les effets des écoulements torrentiels (en général sur le cône de déjection), sans se préoccuper des conditions de déclenchement. Il s'agit :

- soit de laisser passer l'écoulement torrentiel en l'endiguant (canal), en le détournant latéralement, ou en recentrant l'écoulement (digues) ;
- soit de freiner, voire d'arrêter, l'écoulement dans sa phase d'arrêt (plage de dépôt) ;
- soit, si l'on ne peut ou si l'on ne veut pas agir directement sur l'écoulement, de renforcer les constructions de telle sorte qu'elles résistent à l'impact des écoulements torrentiels.

La défense permanente active

Dans ce cas, il s'agit de lutter contre les facteurs favorables à la formation des écoulements torrentiels, en fixant le matériau dans la zone de départ (ou en le stockant), et d'empêcher sa mise en mouvement. On y parvient en aidant la stabilité du lit grâce à des ouvrages de soutien (seuils, barrages), et/ou en reboisant les versants érodés quand cela est possible.

La stratégie de défense temporaire nécessite l'observation du torrent et implique une prise de décision (humaine ou automatique) ; il s'agit en effet de prendre des mesures limitées dans le temps (tant qu'il y a risque) telles que des interdictions de circulation ou des mesures administratives d'évacuation des zones menacées.

Les grands principes et les points critiques

En conclusion, nous rappellerons ici deux grands principes de la protection de l'environnement, extraits de la loi Barnier du 2 février 1995 (Schrefler, 2001) :

- le principe de précaution, selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ;
- le principe d'action préventive et de correction, par priorité à la source, des atteintes à l'environnement, en utilisant les meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable.

Requillard (1997) estime pour sa part que : « *cela ne peut qu'inciter à poursuivre, avec persévérance, voire entêtement, qu'elles qu'en soient les difficultés, l'œuvre entreprise en matière de correction torrentielle, non pour supprimer l'érosion qui est un phénomène naturel, mais pour la ralentir et la contrôler, afin de limiter les dégâts matériels à l'aval et surtout écarter, hors événements à caractères exceptionnel ou imprévisible toujours (hélas) possibles, toute menace envers des vies humaines* ».

	Défense active permanente	Défense passive	
		permanente	temporaire
Type d'actions	Reboisement, revégétalisation : plantation, semis Modification de l'écoulement d'eau : puits, dérivation Consolidation du lit et des berges : seuil, barrage	Déviations, canalisation : galerie, digue, canal surélevé Freinage : tas, dent, obstacle, ouvrage essoreur Arrêt : digue Stockage : plage de dépôt Zonage : PPR Adaptation : renforcement des constructions	Réglementaire : évacuation, consignation Automatique : détecteurs routiers (feux rouges), signalisation
Niveau de sécurité	Bon si bien conçu, bien adapté au contexte et entretenu	Bon si bien conçu	Insuffisant pour des habitations, mais adapté à des routes
Investissement	Très élevé	Elevé à très élevé	Faible
Coût en entretien	Elevé	Faible à élevé	Très faible
Avantage (s)	Techniques solides et éprouvées	Large éventail de solutions techniques	Facilité de mise en œuvre, rapport qualité/prix
Inconvénient (s)	Pérennité, efficacité parfois incertaine (fragilité), entretien pénalisant pour le maître d'ouvrage	Insertion dans le site, curage, parfois facteur aggravant (flottants, stock de matériau en cas de rupture, risque de déstabilisation du lit à l'aval)	Temps de propagation des écoulements torrentiels parfois trop court pour une mise en alerte efficace

Tableau 3 - Récapitulatif des stratégies de défense contre les écoulements torrentiels.

L'auteur suggère également que les efforts doivent aujourd'hui porter sur :

- la sensibilisation des collectivités aux problématiques de risque torrentiel ;
- la mise en œuvre d'une approche globale à l'échelle du bassin de risque ;
- la maintenance des ouvrages de protection torrentielle ;
- le renouvellement coûteux de la forêt de protection.

6.2.3. Protection des aménagements existants sur les cours d'eau

La protection des aménagements existants sur les cours d'eau est un enjeu économique majeur et concerne principalement les ouvrages de franchissements des cours d'eau et les seuils.

Dans le cas des ponts, le principal risque concerne les affouillements autour de leurs piles. On considère en général que la profondeur du phénomène est de l'ordre de 2 à 2,5 fois le diamètre de la pile (ORE, 1998).

Pour une pile de pont :

$$H = 2,5 \times D$$

avec H : profondeur d'affouillement,
D : diamètre de la pile du pont.

Pour les affouillements à l'aval des seuils, on peut considérer la relation suivante :

$$H = 1.44 \times h^{0.5} \times q^{0.6} \times (1/D90)^{0.4}$$

avec H = profondeur d'affouillements sous la crête du seuil ;
h = hauteur d'eau sur la crête du seuil ;
q = débit par unité de largeur.

D'un point de vue général, ces formules offrent une première estimation des profondeurs d'affouillement et elles nécessiteraient d'être calibrées avec des mesures de terrain. La principale difficulté sur le terrain consiste à estimer la profondeur d'affouillement réelle atteinte au plus fort de la crue, sachant que la décrue a pu occasionner un dépôt de matériau non consolidé qui masque l'affouillement.

Dans le même ordre d'idée, l'absence de loi débit-vitesse rend difficile la détermination des affouillements près des endiguements, et le meilleur moyen de les estimer à l'heure actuelle reste l'utilisation de modèles réduits.

6.3. PRÉCONISATION EN TERMES D'AMÉNAGEMENTS OU D'INTERVENTIONS ANTHROPIQUES SUR LE TRANSPORT SOLIDE

Certains aménagements ou interventions anthropiques sur les cours d'eaux ont des conséquences sur le transport solide, qu'il est important de prendre en compte lors de la conception et qui peuvent également intervenir comme critère de décision.

Pour connaître les effets de chaque aménagement ou intervention anthropique, on se reportera en Annexe 4. Les préconisations en termes d'extraction de matériaux sont détaillées ci-dessous.

6.3.1. Préconisation en termes d'extraction de matériaux

En lit mineur, les prélèvements concernent uniquement les opérations de dragage qui ont un objectif d'entretien des cours d'eau.

Les modalités d'exploitation doivent éviter tout risque d'érosion régressive, soit en adaptant les prélèvements à l'observation des exhaussements du lit, soit en construisant à l'amont un seuil. Les volumes extraits doivent être déterminés sur la base d'une étude sédimentaire globale de la rivière et un dispositif de suivi des volumes extraits doit être mis en place.

Des actions de remodelage de la section peuvent être envisagées dans des cas précis d'apports excessifs de matériaux, mettant en péril la sécurité des biens et des personnes. À titre d'exemple, les possibilités d'actions sont :

- le remodelage du lit vif, c'est-à-dire le déplacement du lit vif pour l'éloigner de la berge ;
- les curages du lit vif, qui visent un accroissement de la section d'écoulement dans le but de réduire les débordements et d'alléger les attaques d'érosion sur les berges ;
- les ouvertures de terrasses basses et arasements de bancs figés, qui sont une alternative aux curages du lit vifs et permettent d'accroître la capacité du lit à écouler les crues en minimisant les incidences morphologiques néfastes (abaissement du lit, déficit du transit sédimentaire).

6.3.2. Préconisation lors d'opérations de terrassement

La réalisation de terrassements peut générer d'importants impacts sur le milieu environnant. Ceux-ci sont dépendants d'un grand nombre de paramètres dont notamment :

- taille et type d'ouvrages à réaliser ;
- méthode de réalisation utilisée ;
- phasage des travaux ;
- conditions climatiques ;
- etc.

Pour réduire au maximum les impacts, les mesures à prendre doivent porter sur :

- l'implantation de certaines activités de chantier ;
- la conduite des travaux ;
- la sauvegarde des milieux récepteurs.

Les principaux points consistent à :

- éviter de réaliser les travaux de défrichage et de terrassement en période pluvieuse ;
- stabiliser les sols et réduire la vitesse du ruissellement, même en phase transitoire ;
- prévoir, dès le début des travaux, un réseau de drainage interceptant les écoulements et comportant, si possible, des bassins de décantation ;
- éviter tout prélèvement ou dépôt de matériaux dans les cours d'eau et maintenir le plus possible le lit du cours d'eau en l'état naturel ;
- éviter l'implantation de centrales de fabrication ou le stationnement d'engins dans des zones vulnérables et prévoir au droit de ces installations des bacs et bassins de rétention et des dispositifs d'épuration.

Afin de réduire l'impact de ses terrassements, on pourra utilement s'appuyer sur les recommandations figurant dans les publications du SETRA ayant trait aux chantiers routiers (cf. bibliographie).

7. Conclusions

À l'échelle du bassin versant, la gestion du transport solide recouvre de nombreux enjeux :

- un enjeu environnemental : la qualité des milieux dépend souvent de l'intensité des processus morphodynamiques, et des connexions entre le lit principal et les milieux latéraux (notamment les apports terrigènes particulièrement néfastes pour la santé des coraux dans le lagon) ;
- un enjeu économique : les travaux de confortement imposés par les déséquilibres du lit sont souvent onéreux ;
- un enjeu paysager : les interventions incessantes dans le lit peuvent durablement les défigurer ;
- un enjeu en termes de ressources en eau (abaissement de la nappe, intensité des relations nappe - rivière selon l'état du fond et des berges, fonctionnement des prises d'eau) ;
- un enjeu sur les usages de la rivière et de ses abords (loisirs, hydroélectricité).

Le développement des connaissances concernant le transport solide devrait permettre de définir des mesures adéquates susceptibles de réduire les deux enjeux les plus significatifs en Polynésie : les risques d'inondations et de pollution des lagons.

Le transport solide des rivières est conditionné par la fourniture en amont de sédiments susceptibles d'être transportés. Certaines îles de Polynésie française, dont Tahiti, sont très exposées à cette problématique puisqu'elles sont concernées par des rivières torrentielles susceptibles de concentrer des débits exceptionnels et soumises à une forte érosion due à la conjonction de leur relief, du climat et du développement urbain. En effet, la production est favorisée par :

- les zones de stockage situées dans la partie haute des bassins versants dues par exemple à des glissements de terrain... ;
- l'érosion des versants naturels ;
- le ruissellement sur des surfaces non végétalisées, notamment les zones de déforestation et, surtout les terrassements et les surfaces imperméabilisées ;
- l'érosion des berges du cours d'eau.

La présence d'une plaine côtière et d'une rupture quasi généralisée de la pente des cours d'eaux en partie amont des zones urbanisées favorise, pour certaines d'entre elles, le dépôt (ou atterrissement) des sédiments les plus grossiers (charriage), créant ainsi des surélévations locales des lits des cours d'eau, susceptibles de favoriser ainsi les inondations, sans toutefois empêcher les sédiments plus fins d'arriver jusqu'au lagon où ils constituent une source significative de pollution.

Afin de tenter de pallier à cette problématique, il apparaît donc nécessaire de :

- cerner les principales zones contributrices à l'érosion et aux glissements de terrain ;
- quantifier les apports solides potentiels de ces zones ;
- quantifier les capacités de transports, tant en charriage qu'en suspension, des principaux cours d'eau situés en amont des principaux enjeux (urbanisations et lagons).

Une carte de sensibilité à l'érosion à l'échelle de l'île permettra de donner un aperçu général nécessaire. Pour cela, il a été mis en évidence que seules des mesures expérimentales permettraient de recalibrer des modèles de mesures de l'érosion des sols à l'échelle de l'île.

Notamment, les formules ou modèles d'estimation des apports (par exemple le modèle USLE dit « de Wischmeier »), des débits liquides (crues) et des transports solides (formules empiriques) existants, sont essentiellement déterminés pour des climats et reliefs très différents et ne peuvent donc être appliqués, dans l'état, au contexte polynésien. Il apparaît ainsi fortement souhaitable de confronter ces modèles avec des mesures et des observations de terrains, pour vérifier dans un premier temps leur pertinence et, dans l'affirmative, les caler avec des données spécifiques.

Les opérations qui pourraient être envisagées en Polynésie française sont :

- localiser les zones préférentielles d'érosion et/ou de glissement de terrain ;
- maintenir voire développer les stations hydrométriques permettant la connaissance des débits liquides. Le réseau existant, décrit au § 5.2, est insuffisant ;
- équiper les principales stations hydrométriques, situées en amont des lagons sur la plaine côtière, de préleveurs automatiques ou, pour le moins, la réalisation de prélèvements, afin de préciser les volumes de sédiments en suspension susceptibles d'atteindre le lagon ;
- envisager la mise en place de moyen de mesures ou d'évaluation des sédiments charriés en installant des équipements tels que ceux listés dans ce rapport, ou par des campagnes topographiques régulières. Il s'agit ici de localiser les zones de dépôts et, s'il y a lieu, de les entretenir par des opérations de recalibrage ou de dragage ;
- sur la base de ces nouvelles connaissances, choisir, suivant les îles, les formules de calcul les plus adaptées.

8. Bibliographie

Agence de l'eau Rhône-méditerranée-Corse (1999) - La gestion des rivières Transport solide et atterrissements. Guide méthodologique.

Barton J.S., Slingerland R.L., Gabrielson T.B. and Johnson P.A. (2003) - Listening to Bedload: A Flume Study Relating Acoustic Response to Bedload Motion, in Sediment Monitoring Instrument and Analysis Research Workshop, Flagstaff, 2003.

Belleudy P. (2001) – Le transport solide en rivière : lacunes de connaissance et besoins méthodologiques. Mémoire de recherche présenté à l'institut National Polytechnique de Grenoble le 14 Novembre 2001.

Bogen J., Moen K. (2002) - Bed load measurements with a new passive ultrasonic sensor, in *Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances*, Oslo, 2002.

Borges A.L., Brochot S., Meunier M. (1994) – Modèle hydrosédimentologique des écoulements hyperconcentrés d'un petit torrent des Alpes du Sud. La Houille Blanche/ N°3-1994.

Bravard J.-P., Petit F. (2000) – Les cours d'eau, dynamique du système fluvial. 27^{ème} édition. Armand Colin.

Bravard J.-P., Peiry J.-L. (1999) – The CM pattern as a tool for classification of alluvial suites and floodplains along the river continuum. From Marriott. S. B. & Alexander. J. (eds) 1999. Floodplains: Interdisciplinary approaches. Geological Society, London, Special Publications, 163, 259-268.

BRGM – SGR/REU (1996) – Les laves torrentielles. Communication à la Préfecture du 20 Août 1996.

BRGM – RP-53234-FR (juin 2004) – Analyse bibliographique- Projet DYNTOR sur l'érosion, le transport solide et la dynamique torrentielle des rivières de la Réunion.

Brochot S. (2002) – Les mécanismes de l'érosion et du transport solide du bassin de réception au cours d'eau. C.R. Acad. Agric. Fr., 2002, 88, n°1. Séance du 30 janvier 2002.

Brochot S., Marchi L., Lang M. (2002) – L'estimation des volumes des laves torrentielles : méthodes disponibles et application au torrent du poucet (Savoie). Bull. Eng. Geol. Env. (2002) 61:389-402.

Brochot S. (1998) – Données d'érosion torrentielle (ablation des versants et production de sédiments des bassins versants). Cemagref, division Érosion torrentielle neige et avalanches.

Brochot S. (1998) - Stage Correction torrentielle RTM 28 09 –02 10 98. Module conception du dispositif de prévention / protection. Cemagref Grenoble ETNA. *Versions 1 & 2.*

Brochot S., Koulinsky V., Rovera G. (1998) – Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle, apports des versants et production de sédiments.

Brochot S. (1997) – Modèle d'érosion en bassin versant montagneux. Cemagref, division Érosion torrentielle neige et avalanches.

Brochot S. (1993) – Définition de l'érosion torrentielle (apports des versants) en Haut-Vallespir (Pyrénées orientales, France). Dossier de la revue géographie alpine n° 11 1993.

Bunte K. (1998) - Development and field testing of a stationary net-frame bedload sampler for measuring entrainment of pebble and cobble particles, pp. 74 pp., Stream Systems Technology Center, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins.

Bunte K., Abt S.R. (2002) -Sampler size and sampling time affect measured bedload transport rates and particle sizes in gravel-bed streams, in *Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances*, Oslo, 2002.

Bunte K., Potyondy J.P., Abt S.R. (2003) - Development of an improved bedload trap for sampling gravel and cobble bedload in coarse mountain streams, in *Sediment Monitoring Instrument and Analysis Research Workshop*, Flagstaff, 2003.

Cardoso A.H. Neves G.O. (1994) – Prévion du transport solide, Évaluation des formules existantes. *La Houille blanche/N° 4-1994*

Carling P.A., Benson I., Richardson K. (2002) - A new instrument to record sediment movement in bedrock channels, in *Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances*, Oslo, 2002.

Carpenter M.C., Cluer B.L., Smith G.R., Wick E.J., Lockett J.L., Brockner S.J. (2001) - Field trials monitoring sand deposition and erosion on a razorback sucker spawning bar on the Green River near Jensen, Utah, and operational description of load-cell scour sensors, in *New & Evolving Concepts in Indirect Discharge Measurements*, Front Royal, Virginia, 2001.

Coussot P. (1994) – Lois d'écoulements des laves torrentielles boueuses. *La Houille Blanche/ N°3-1994.*

Coussot P., Laigle D. (1994) – Étude des laves torrentielles sur modèle réduit en similitude des phénomènes naturels. *La Houille Blanche/N°3-1994.*

Couvert B., Lefèvre B. (1994) – Contribution de modèles physiques à l'étude du charriage torrentiel. *La Houille blanche/N° 3-1994.*

Cruchet M. (1996) – Les laves torrentielles. Publication « les coins de l'expert ».

Ergenzinger P.J., Custer S.G. (1983) - Determination of Bedload Transport Using Naturally Magnetic Tracers: First Experiences at Squaw Creek, Gallatin County, Montana, *Water Resour. Res.*, 19 (1), 187-193, 1983.

Froehlich W. (2002) - Monitoring of bed load transport in streams by use of acoustic and magnetic device, in *Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances*, Oslo, 2002.

Garcia C., Laronne J.B., Sala M. (2000) - Continuous monitoring of bedload flux in a mountain gravel-bed river, *Geomorphology*, 34, 23-31, 2000.

Graf W.H. (2000) – Hydraulique Fluviale, écoulements et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple. *Traité de Génie Civil de l'École polytechnique fédérale de Lausanne*, volume 16. Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne.

Gottesfeld A.S., Tunncliffe J. (2002) - Bed load measurements with a passive magnetic induction device, in *Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances*, Oslo, 2002.

Graf W.H. (2000) – Hydraulique Fluviale, écoulements et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple. *Traité de Génie Civil de l'École polytechnique fédérale de Lausanne*, volume 16. Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne.

Habersack H., Nachtnebel P.N., Laronne J.B. (2001) - The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river with a slot sampler, *J. Hydraul. Res.*, 39, 125-133, 2001.

Habersack H.M. (2002) - Stochastic nature of bedload transport - results from radio-tracking gravel particles, in *Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances*, Oslo, 2002.

Hassan M.A., Church M. (1991) - Distance of movement of coarse particles in gravel bed streams, *Water Resources Research*, 27, 503-511, 1991.

Helley E.J., Smith W. (1971) - Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler, pp. 18 pp., U.S. Geological Survey Open-File Report, 1971.

Jordan J.P. (1994) – bassin de recherche et modélisation des processus de formation des crues, proposition d'une approche couplée. *La Houille Blanche/ N° 3-1994*.

Koulinsky V., Bois P., Lefort P. et Meunier M. (1994) – Étude de la formation d'un lit torrentiel : Dune à forte pente et pavage. *La Houille Blanche / N°3-1994*.

Laigle D. et Coussot P. (1994) – Modélisation numérique des écoulements de laves torrentielles. *La Houille Blanche/N°3-1994*.

Larone J., Alexandrov Y., Bergman N., Cohen H., Garcia C., Habersack H.M., Powell M. and Reid I. (2002) - The continuous monitoring of bedload flux in various fluvial environments, in *Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances*, Oslo, 2002.

Lavabre J., Folton N., Arnaud P., Pasquier C. – Prédétermination régionale des débits de crue, exemple d'application à la Corse.

Lefort P. (1991) - Transports solides dans le lit des cours d'eau – Cours à l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Macéanique de Grenoble. Institut National Polytechnique de Grenoble.

Lewis J.C. (1991) - An improved bedload sampler, in *Fifth Federal Interagency Sedimentation Conference Proceedings*, edited by S. Fan, and Y.H. Kuo, pp. NV. 6-1 to 6-8, Las Vegas, 1991.

Lilin C. (1996) – Histoire de la restauration des terrains en montagne au 19e siècle - Cah. Orstom, sér, Pédol, vol. XXII, n°2, 1986 : 139-145.

Marchi L., Brochot S. (2000) – Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises, morphométrie et procédés de transport solide torrentiel. Revue de géographie alpine – n°3 t 88 2000.

Mathys N., Brochot S., Lacheney B. (2000) – Genèse des crues et érosion dans les petits bassins versants de montagne : observations et résultats obtenus sur les bassins versants expérimentaux de Draix (Alpes-de-Haute-Provence). Forêt méditerranéenne, t.XXI, n°2, juin 2000.

Meunier M. (2001) – Regional flow-duration-frequency model for the tropical island of Martinique. *Journal of hydrology* 247 (2001) 31-53.

Meunier M. (1996) – Phénomènes érosifs et risques torrentiels en montagne. C.R. Acad. Agric. Fr., 1996, 82, n°3 pp.5-16. Séance du 20 mars 1996.

Meunier M. (1996) – Couvert forestier et cures sur les petits bassins versants de montagne, quelques enseignements des bassins expérimentaux de Draix. *Unasylva* 185, Vol. 47, 1996.

Meunier M. (1994) – Les progrès de la connaissance et les méthodes d'étude des phénomènes torrentiels. *La Houille Blanche*/ n° 3-1994.

Meunier M. (1991) - Éléments d'hydraulique torrentielle. *Études Montagne* n°1. CEMAGREF.

Meunier M. et Carion C. (1987) – Étude méthodologique de la détermination des courbes granulométriques des lits des cours d'eau. CEMAGREF, groupement de Grenoble, Division Protection contre les Érosions.

Meunier M. (2001) – Les torrents du Nord-Ouest de la Martinique. Hydrologie des crues, érosion, hydraulique et dynamique torrentielles. Études du Cemagref, série équipements pour l'eau et l'environnement, n°24.

Nawa R.K., Frissell C.A. (1993) - Measuring scour and fill of gravel streambeds with scour chains and sliding-bead monitors, *North American Journal of Fisheries Management*, 13, 634–639, 1993.

Nearing M.A (1997). A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. *Soil Science of America Journal*, 61, 917-919.

Ouillon S. (1998) – Érosion et transport solide : ampleur et enjeux. *Al Houille Blanche/ N°2-1998*.

Peyri J.-L., Marnezy A.– Les barrages et réservoirs hydroélectriques des alpes françaises et leur impacts sur les cours d'eau.

Philiponnat M. (1970) - Problèmes routiers de lutte contre l'érosion en zone tropicale. Compte rendu de conférence au Centre Expérimental de recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics.

Powell M., Laronne J.B., Reid I. (2002) - The dynamics of bedload sediment transport in low-order, upland, ephemeral gravelbed rivers, in *Advances in Environmental Monitoring and Modelling*, 2002.

Requillard J.-P. et al. (1997) – Évolution de la politique de protection contre les torrents au cours de ces deux derniers siècles. *Risques Infos n°8 – Avril 1997*.

J.-P. Requillard et al. (1997) – Correction des torrents en Isère. *Risques Infos n°8 – Avril 1997*.

Réméniéras G. (1999) – L'hydrologie de l'ingénieur. Collection de la Division Recherche et Développement d'Électricité de France. Éditions Eyrolles.

SOGREAH (1969) – Franchissement routier de la rivière Saint-Etienne, protection contre les crues, volume 1 : Étude sur modèle réduit.

Schrefler B., Delage P. (2001) – Risques naturels et Patrimoine. Editions Hermès Paris
p 22-24.

Tunncliffe J., Gottesfeld A.S. and Mohamed M. (2000) - High resolution measurement of bedload transport, *Hydrol. Processes*, 14 (2631-2643), 2000.

Veyrat-Charvillon S., Brochot S., Peyri J.-L. (2001) – Prédiction globale de la production de sédiments des bassins versants torrentiels, dynamique de la fourniture des matériaux au torrent du Manival (Isère).

Wischmeier WH., Smith D.D. (1978) - Predicting Rainfall-Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Agricultural Handbook No. 537. US Department of Agriculture, Washington, DC.

Bibliographie « Routière »

Collection de guides techniques du SETRA "L'eau et la route", 8 volumes.

Guide méthodologique SETRA – CERTU : "Projets routiers-Le dossier d'étude d'impact".

Guide méthodologique SETRA : "Projets routiers interurbains - Suivis et bilans environnementaux".

Rapport LCPC - Collection Études et recherches / Routes - n° CR 27 "Pollution et impact d'eaux de ruissellement de chaussées" .

BRGM - Collection Manuels et méthodes - n° 36 Pollutions accidentelles routières et autoroutières".

Bibliographie Locale

Servant J. 1974. Un problème de géographie physique en Polynésie Française : l'érosion. Exemple de Tahiti. Cah. ORSTOM, sér. Sci. HI~, vol. XI, no 314 - 1974 : 203-209.

Wotling G., Bouvier C. 2002. Impact of urbanization on suspended sediment and organic matter fluxes from small catchments in Tahiti.

Hildenbrand A., Gillot P.Y., Marlin C. 2007 Geomorphological study of long-term erosion on a tropical volcanic ocean island : Tahiti-Nui (French Polynesia)

Fengyin Ye, Sichoix L., Barriot JP, Dumas P. (2009 ?) - Modeling the erosion of shield volcanoes: The Tahiti case.

Ministère de la Santé, de l'Environnement et de la Recherche scientifique, délégation à l'environnement (1989) - Mise au point des techniques de lutte contre l'érosion et la sédimentation dans les lagons de Polynésie Française. Rapport de première phase d'étude.

Ministère de la Santé, de l'Environnement et de la Recherche scientifique, délégation à l'environnement (1990) - Techniques de lutte contre l'érosion des sols. Synthèse bibliographique. Tahiti Polynésie Française.

Simoneau X., Espada J. L. (1991) – "Étude de Talus – Lutte contre l'érosion – Stabilité des pentes Phase 1 & 2" – RAP.N°91/336. D90004 – Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie.

Soroste M., Espada J. L., Simoneau X. (1994) – "Talus – Lutte contre l'érosion – Phase 3" – PVN°91/583. D90005 – Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie.

Lembezat C., Mompelat J. M., Wong-fat S. – (2003) Programme ARAI. Rapport d'avancement à fin 2003 au terme de la première année d'activité. Rapport BRGM/RP-52929-FR 132 p, 64 ill., 3 ann. hors texte.

Nédellec J. L., Mathon C. (2006) - Programme ARAI – Action 3.1 – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain – Caractérisation géotechnique des altérites volcaniques (« mamu ») – rapport final – BRGM/RP-54835-FR 108 p, 39 ill., 20 tabl., 9 ann. hors texte.

Nédellec J. L., Mathon C. – (2006) – "Programme ARAI - Action 3.1. – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain – Caractérisation géotechnique des altérites volcaniques ("mamu") - Rapport final" – BRGM/RP-54835-FR 108 p, 39 ill., 20 tabl., 9 ann. hors texte.

Atlas de la Polynésie Française – ORSTOM – 1993 – cartes diverses.

Dewez T., Nachbaur A., Sedan O. (2010) – Programme ARAI 2. Érodibilité des talus de Polynésie française : analyse morphologique 2D et 3D par reconstitution stéréophotogrammétrique. Rapport final. BRGM/RP-58965-FR, 149 p., 73 fig., 9 tab., 4 ann.

Glossaire

Affouillement

Ce terme est parfois employé à tort au sens d'abaissement du lit. On le réservera aux phénomènes locaux de surcreusement contre des obstacles (piles de pont, pied de berges) sans qu'il y ait évolution générale du lit.

Capacité de transport

Débit solide que la rivière est capable de transporter pour un matériau de granulométrie donnée. On parle de capacité maximale de transport lorsque l'on prend pour hypothèse que les matériaux solides sont disponibles et ne sont pas un facteur limitant du transport solide.

Chenalisation

Terme fréquemment employé de nos jours pour désigner des réalités très différentes : suppression des possibilités de débordement, fixation des berges, réduction des possibilités de divagation, recalibrage rectiligne, développement d'un lit unique... Il est préférable de spécialiser le terme pour désigner l'évolution du style fluvial d'un cours d'eau vers un lit à chenal unique, profond, peu mobile enserré entre des bancs élevés fixés par la végétation. Une telle évolution est généralement le signe d'un manque de mobilité dû à la combinaison d'un déficit d'apports solides et d'une réduction des débits actifs.

Curage

Curage et extractions représentent des opérations de même nature. Mais le curage est une opération non régulière, qui répond à des impératifs hydrauliques. L'extraction correspond à une exploitation économique des alluvions en vue de leur utilisation, qui conduit à des prélèvements réguliers quels que soient les apports réels d'un cours d'eau. C'est pourquoi elles ne peuvent plus être envisagées que dans des circonstances exceptionnelles (queues de retenues, par exemple), et accompagnées de précaution (seuils anti-érosion régressive, notamment).

Granulométrie

La granulométrie des matériaux est définie par des diamètres caractéristiques, qui ne sont dépassés par x % en poids des matériaux : 90 % des matériaux en poids ont un diamètre inférieur au d_{90} , 50 % au d_{50} (appelé aussi diamètre médian), 30 % au d_{30} . Le diamètre moyen d_m est la moyenne des diamètres caractéristiques pris à intervalles réguliers (par ex., moyenne de $d_5, d_{15}; d_{25} \dots d_{95}$).

Incision

Terme employé fréquemment dans un sens général d'abaissement du lit des cours d'eau. Il est préférable d'employer pour le cas général le terme d'abaissement. Le terme incision renverra plutôt aux phénomènes d'abaissement du lit (souvent associé à une forte réduction de la largeur du lit) dans un contexte de déficit d'apports, en excluant les abaissements provoqués directement par des prélèvements de matériaux (abaissement au droit de zone d'extraction).

Pavage

Le terme pavage désigne d'une manière générale la présence à la surface du lit de matériaux plus grossiers que les alluvions normales. Lorsque les matériaux grossiers ont une origine extérieure au cours d'eau (blocs éboulés du versant...) on évitera le terme de pavage. On parlera plutôt de fixation du lit par des blocs. Le terme de pavage est réservé aux phénomènes de tri granulométrique et, plus précisément, aux phénomènes de tris granulométriques amplifiés par un déficit d'apports solides (mécanisme d'érosion progressive par exemple). Lorsque le tri résulte de la dynamique normale des formes fluviales, on parlera plutôt d'armurage.

Respiration du lit

La respiration du lit est un terme réservé aux variations réversibles du lit en altitude. Pour les variations en plan, on parlera plutôt de divagation ou de mobilité latérale.

Substrat, substratum

Le substratum est la formation géologique non alluviale qui se trouve sous les alluvions du cours d'eau. Le substrat désigne de hydrobiologie, les matériaux du fond du lit en tant que caractéristique des habitats de la faune et de la flore benthique.

Annexe 1

Concepts de base utilisés pour caractériser le transport solide en hydraulique fluviale et introduction à l'hydraulique torrentielle

L'objectif de ce chapitre est de présenter brièvement les concepts de base utilisés pour caractériser le transport solide en hydraulique fluviale, afin de différencier par la suite ceux qui restent valables en hydraulique torrentielle de ceux qu'il faudra modifier. Les symboles utilisés dans ce chapitre sont définis en p 15.

Les concepts de base en hydraulique fluviale

Le concept de contrainte de cisaillement

Pour un écoulement permanent et uniforme de hauteur h , de pente I , à la hauteur y , s'exerce sur un élément de largeur unité une **contrainte de cisaillement** (τ) qui équilibre le poids du volume de fluide hachuré sur la Figure 32.

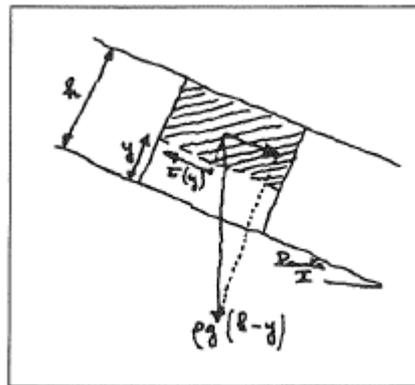


Figure 32 - La contrainte de cisaillement (Meunier, 1991).

Cette contrainte de cisaillement rend compte, au niveau du fond, du frottement sur la paroi ainsi que de la poussée hydrodynamique qui s'exerce sur les matériaux solides d'un lit mobile. À l'intérieur du fluide, elle provoque les mouvements des particules fluides entre elles, qui s'organisent selon deux modalités, suivant que la viscosité est suffisante ou non pour supporter l'effet de la contrainte :

- si la viscosité est suffisante, le régime d'écoulement est laminaire ;
- si elle ne l'est pas, un effet de turbulence s'ajoute alors pour compenser le supplément de contrainte.

$$\tau = \underbrace{\mu \left(\frac{du}{dy} \right)}_{\text{viscosité}} + \underbrace{\rho l^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2}_{\text{turbulence}}$$

La viscosité est due aux forces d'attraction moléculaire et traduit la capacité des molécules d'eau à se déplacer les unes par rapport aux autres tout en restant liées ; la turbulence se produit à une échelle d'espace bien supérieure par déplacements de tourbillons de plus grande échelle.

Le tableau 1 synthétise la part de la viscosité et de la turbulence dans la dissipation d'énergie pour des styles fluviaux différents (Meunier, 1991) :

	Pente	Hauteur	Coefficient de rugosité	U (m/s)	du/dy (s ⁻¹)	Contribution de la viscosité		Total (Pa)	Contrainte (Pa)
						Viscosité (Pa)	Turbulence (Pa)		
Fleuve	0.0001	4	40	1	0,65	0,00065	10.8	10.8	3.6
Rivière	0.001	2	35	1,75	2,28	0,00228	33	33	18
Rivière torrentielle	0.02	1	30	4,2	11	0,011	193	193	180
Torrent	0.1	1	20	6,3	13,9	0,0139	309	309	900

Tableau 4 – Comparaison de la contrainte de cisaillement, de la viscosité et de la turbulence (Meunier, 1991)

L'analyse de ces résultats montre que :

- la part de contrainte supportée par la viscosité est négligeable dans tous les cas de figure, dans les cas usuels d'hydraulique fluviale, il est donc légitime de ne prendre en compte que la turbulence ;
- la comparaison entre la viscosité et la turbulence montre bien que la seconde dissipe beaucoup plus d'énergie que la première ;
- la contrainte de cisaillement est inférieure à la turbulence sauf dans le cas d'un torrent. Dans le cas des torrents, **il y a donc une autre cause de dissipation d'énergie qui vient s'ajouter à la turbulence** (Meunier, 1991).

Régime permanent et régime uniforme

Le régime permanent est obtenu lorsque l'écoulement ne varie pas dans le temps et le régime uniforme lorsque le chenal d'écoulement ne varie pas dans l'espace.

Le concept de régime permanent et uniforme permet de simplifier notablement les équations de l'hydraulique fluviale. Néanmoins, en pratique, ce régime particulier se rencontre assez souvent, dans les canaux artificiels à section constante et dans les fleuves, on trouve des sections suffisamment longues pour que le concept de régime permanent et uniforme soit opérationnel. Dans ces cas de figure, on utilise généralement la **formule de Manning Strickler** qui permet de relier le débit liquide aux caractéristiques locales de l'écoulement :

$$Q = K \times R^{2/3} \times I^{1/2} \times S$$

- Q débit liquide,
- K le coefficient de rugosité empirique,
- R rayon hydraulique,
- S section de l'écoulement,
- I pente de l'écoulement.

Lorsque le chenal d'écoulement varie, le régime est varié. Aux passages des seuils ou singularité, le régime est brusquement varié, et lorsque le débit varie, le régime est transitoire. Dans ces deux derniers cas, les lois de l'hydraulique ne sont plus simplifiables.

Expression simplifiée du transport solide de charriage

En se basant sur les forces qui interviennent dans le mouvement et en simplifiant notablement, il est possible de formuler le problème du transport solide en fonction de quatre variables adimensionnelles (cf. liste des symboles p. 15).

$$X = \frac{\rho u_* d_{50}}{\mu}$$

$$Y = \frac{\rho u_*^2}{g(\rho_s - \rho)d_{50}}$$

$$Z = \frac{h}{d_{50}}$$

$$W = \frac{\rho_s}{\rho}$$

- ρ_s est la masse volumique du sédiment ;
- d_{50} le diamètre médian des grains.

X représente le nombre de Reynolds de grains, Y le rapport des forces hydrodynamiques agissant sur le grain à son poids immergé, Z représente la hauteur d'eau et W l'inertie du grain.

Le débit solide et le problème du seuil de charriage peuvent s'exprimer sous forme adimensionnelle en fonction de ces quatre variables. La courbe de Shields délimite, dans un plan X, Y la zone avec transport et la zone sans transport. On voit que pour $X > 100$, on a $Y = 0,058$.

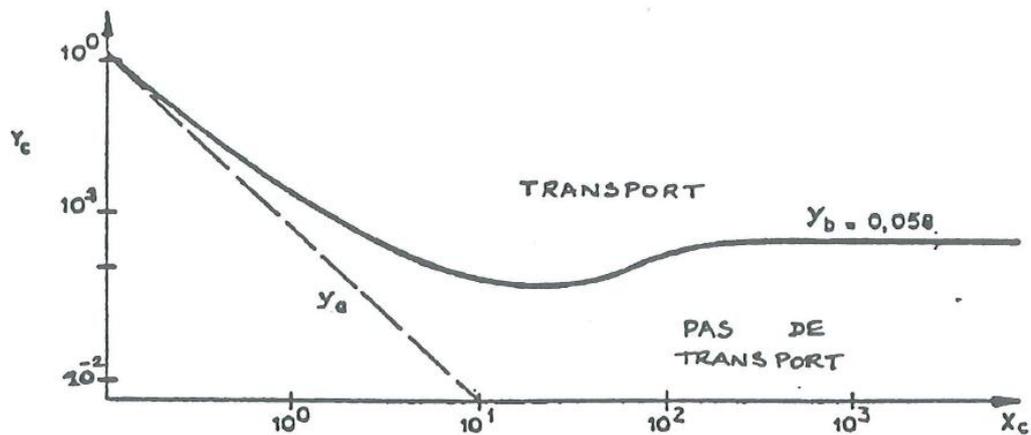


Figure 33 - Courbe de Shields donnant le seuil de charriage (Meunier, 1991).

Pour le domaine suivant, qui intéresse les rivières torrentielles :

- $0,01 < h < 1,2$ m ;
- $4 \cdot 10^{-4} < I < 2 \cdot 10^{-2}$;

- $0,4 \text{ mm} < d_{50} < 30 \text{ mm}$;
- $0,25 \cdot 10^{-4} < g(\rho_s - \rho) < 3,2 \cdot 10^{-4}$;

Meyer Peter a trouvé $Y = 0,0047$ (souvent pris égal à 0,005), ce qui permet d'exprimer Y de la façon suivante :

$$Y = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d_{50}}$$

Si la contrainte de cisaillement dépasse un seuil critique, le grain est détaché du fond. D'après cette formulation la résistance du grain au transport est donc reliée au poids immergé du grain de taille médiane.

Les simplifications par rapport à la réalité du terrain sont nombreuses :

- l'étendue de la courbe granulométrique est occultée (tous les grains dans un cours d'eau naturel n'ont pas le même diamètre) ;
- les irrégularités de la surface du lit ne sont pas prises en compte, aussi bien les configurations de forme (rides, dunes, etc.) que la protection des petits grains par les gros qui les cachent ;
- l'armature du pavage qui rend les grains solidaires les uns des autres est négligée ;
- on néglige le coté aléatoire de la turbulence qui rend la contrainte de cisaillement τ_0 variable au cours du temps.

De manière simplifiée, la loi de charriage la plus simple et la plus largement utilisée en hydraulique fluviale est la formule de Meyer-Peter :

$$Q_s = \frac{8}{g(\rho_s - \rho)} \frac{1}{\sqrt{\rho}} (\tau - \tau_c)^{3/2}$$

On peut insister sur l'hypothèse non formulée mais importante qui veut que le débit liquide et le débit solide soient reliés par une relation biunivoque, ce qui est largement remis en cause à l'heure actuelle.

Gamme d'utilisation des concepts d'hydraulique fluviale en ingénierie

L'hydraulique fluviale est une discipline maîtrisée puisque, en pratique, on dispose de trois outils de dimensionnement nécessaires à tout problème d'aménagement :

- une formule de calcul de débit en régime permanent, la formule de Manning Strickler ;
- des formules de démarrage du transport solide, comme celle de Shields ;
- des formules reliant le débit liquide au débit solide comme celle de Meyer Peter.

Ces formules sont valables et donc, ne sont utilisables qu'en régime permanent uniforme. Leur utilisation hors du domaine de validité conduit à des aberrations (Meunier, 1991).

Les spécificités de l'hydraulique torrentielle

Ce chapitre a pour objet de spécifier les différences entre l'hydraulique des torrents et celle des rivières.

Contrainte de cisaillement et hydrostaticité

Certains auteurs, par extension de l'expression de la contrainte de cisaillement en régime permanent uniforme, ont développé la formule suivante, où ρ_m est la masse volumique du mélange (eau + solides) :

$$\tau_0 = \rho_m g h I$$

L'extension de la formule présentée au 3.1 peut paraître abusive ; néanmoins, le concept de contrainte de cisaillement conserve sa signification physique si l'on se place à une échelle plus grande, où les notions de valeur moyenne sont valables (Figure 34). La même question que précédemment se pose alors pour le calcul de la pression hydrostatique : faut-il prendre en compte la masse volumique du mélange comme le stipule la formule ci-dessus ?

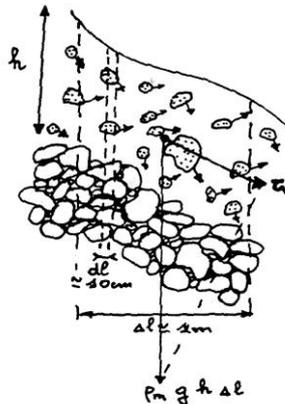


Figure 34 - Contrainte de cisaillement en écoulement torrentiel.

À titre d'exemple, si à de faibles concentrations, la différence est négligeable, pour des concentrations de l'ordre de 400 g/l, la densité du mélange est de 1,25. D'un point de vue purement physique la question réside dans le fait de savoir si le poids des éléments solides dans leur mouvement est supporté intégralement par le fluide (Meunier, 1991).

Dissipation d'énergie et loi de comportement interne

En hydraulique fluviale, le support de l'écoulement est un fluide, et la présence d'un faible pourcentage volumique de matériau solide ne change pas sa nature, ni par conséquent sa loi de comportement interne. Dans ce cas, le mode de dissipation de l'énergie s'effectue par **les frottements au fond** et la **turbulence** (et non la viscosité).

Il a déjà été démontré que la turbulence ne suffisait plus en hydraulique torrentielle. Les autres forces qui interviennent dépendent, selon Meunier (1991), de la nature du matériau qui s'écoule (fluides visqueux à seuil, mélange d'un fluide et de particules solides, matériau solide déformable). À chacun de ces cas correspond un jeu de dissipation d'énergie différent. Les contraintes de résistance possibles sont :

- la viscosité qui peut devenir plus importante ;
- les mouvements vers le bas des gros éléments qui peuvent provoquer des mouvements ascendants du fluide, contribuant ainsi à l'ascension des particules voisines ;
- un effet de limitation de l'espace qui intervient si les particules sont nombreuses, les particules entrant alors en collision.

Ces trois contraintes joueraient à un niveau particulière, voire moléculaire, auquel il faudrait rajouter la turbulence. Suivant la nature exacte du matériau, il existerait ainsi plusieurs domaines de l'hydraulique torrentielle, comme nous l'expliciterons par la suite.

Régime permanent et uniforme

En hydraulique torrentielle, l'hypothèse du régime permanent uniforme est réellement éloignée puisque les biefs sont très courts, et que la pente et la morphologie du cours d'eau varient brusquement. Néanmoins, il est toutefois possible d'approcher ce régime dans les sections artificialisées et souvent endiguées.

Faute de mieux, ce concept est considéré par les auteurs comme opérationnel, et permet d'approcher les phénomènes de transport solide en hydraulique torrentielle.

Par contre, il n'est plus possible de négliger l'influence du transport solide dans le calcul de la hauteur totale de l'écoulement, la hauteur d'écoulement ne correspond plus à la hauteur d'eau à partir d'une pente de l'ordre de 7 à 10 % de par la présence d'un fort volume solide.

Sur les pentes des torrents ou des rivières torrentielles, un écoulement sans sédiment et ayant un fond fixe est **supercritique**. Lorsque l'on reproduit le charriage torrentiel au laboratoire en chenal contraint, on arrive à obtenir des écoulements à nombre de Froude durablement supérieurs à 2.

Par contre, en chenal à largeur d'écoulement libre, avec un lit fortement mobile, de nombreux auteurs ont constaté que le transport solide et la morphologie du lit, qui

varient de façon permanente pendant les crues, évoluent de manière que l'écoulement se maintienne au voisinage d'un nombre de Froude égal à 1 (Koulinsky, 1994).

Quelques difficultés supplémentaires

Les lois de démarrage du transport solide exposées au paragraphe 3.1 sont souvent utilisées en ingénierie, faute de mieux. Ces formulations ne tiennent pas compte de la pente ; alors que celle-ci influence les seuils de début de charriage. En effet, au niveau élémentaire, la résultante des forces agissant sur un grain (poids et force hydrodynamique) varie quand la pente varie.

Les phénomènes de tri granulométrique et le pavage en particulier provoquent une résistance à l'arrachement qui n'est pas prise en compte dans les équations proposées précédemment.

En hydraulique fluviale, les parois jouent un rôle vis-à-vis du frottement, cet effet se traduit par la prise en compte du rayon hydraulique dans le calcul de la perte de charge. Dans le cas de fluides très visqueux, la loi de comportement du fluide est sensiblement différente que dans le cas de l'hydraulique à eau claire puisque cette loi est à seuil critique. Dans le cas des fluides très chargés en particules, le manque de place oblige les particules à rester côte à côte. Dans ces deux cas extrêmes, les parois jouent peut être un rôle spécifique.

En conclusion, les crues des torrents (crues torrentielles au sens strict), ne constituent pas simplement une catégorie particulière des crues des rivières. Les conséquences du caractère montagneux des bassins versants, et en particulier leurs fortes pentes, sont déterminantes non seulement pour l'accélération des processus de génération et de propagation des crues, mais également pour l'apparition de processus nouveaux d'arrachement et de transport de sédiments. Il en résulte la formation et l'écoulement de fluides nouveaux, complexes, que l'hydraulique utilisée en cours d'eau de pente modérée ne peut expliciter.

Annexe 2

Variables clés régissant le transport solide

Seuil de début de transport

Contexte

Dans les torrents, les apports de matériaux sont conséquents et peuvent constituer, si le lit n'est pas déstabilisé, la seule fourniture de matériaux solides. Théoriquement, on devrait distinguer un seuil (contrainte ou débit critique) de transport de matériaux (sous-entendu apports de versants ou secteur du lit non consolidé) et un autre seuil à partir duquel s'effectue l'érosion du lit. Ce phénomène est particulièrement net lorsque le lit a formé une structure pavée (pavage de surface ou profil en long en marche d'escalier).

En pratique, il est difficile d'aller si loin dans le raisonnement car :

- il est difficile de quantifier, d'une part, les matériaux qui participent à l'ossature du lit (secteur consolidé), d'autre part, les matériaux facilement transportables ;
- les méthodes disponibles pour calculer le seuil de début de transport ont été déduites d'essais en laboratoire qui réduisent fortement la complexité du milieu naturel.

Malgré ces limitations, le problème du démarrage du transport solide peut être formulé soit en utilisant le concept de **contrainte critique de cisaillement**, soit en calculant un **débit critique de début de transport**.

Contrainte de cisaillement

Nous allons citer les travaux de différents auteurs qui ont essayé de tenir compte de la forte pente dans l'expression de la contrainte de cisaillement.

Soit τ^* la contrainte de cisaillement adimensionnelle :

$$\tau^* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)d_{50}}$$

En se basant sur des résultats expérimentaux, MIZUYAMA a proposé la formule suivante :

$$\tau_c^* = 0.04e^{4I}$$

avec I pente en m/m.

La pente et la rugosité relative (d_{50}/h) étant liées, à débit constant, d'autres auteurs ont privilégié l'approche suivante (GRAF) :

$$\tau_c^* = 0.6I \frac{h}{d_{50}}$$

avec $1 < (h/d_{50}) < 16$

Le problème de début de transport dans les cours d'eau à forte pente présenté sous la forme de la contrainte critique de cisaillement a été étudié. En pratique, ce n'est pas la formulation la plus utilisée car elle est moins « parlante » que l'utilisation de seuil de début de transport exprimé comme un débit de début d'entraînement.

Débit critique de début d'entraînement

Nous allons présenter de la même manière les résultats de travaux réalisés en laboratoire qui permettent de formuler le débit de début d'entraînement.

Bathurst a proposé, à partir d'essais sur du matériau uniforme, en régime permanent et pour des pentes allant de 0,25 à 25 %, la formule suivante :

$$\frac{q_c}{g^{1/2} d_{50}^{3/2}} = 0.15 I^{-1.12}$$

avec q_c en $m^3/s.m$

Rickenman reformule cette expression pour la comparer à l'équation de WITTAKET et JAEGGI qui traduit le début de la destruction d'une rampe de blocs de taille à peu près uniforme :

$$\frac{q_c}{g^{1/2} d_{50}^{3/2}} = 0.65 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{1.67} I^{-1.12}$$
$$\frac{q_c}{g^{1/2} d_{65}^{3/2}} = 0.143 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{1.67} I^{-1.167}$$

Dans cette dernière formulation, le rôle de la pente est plus grand et la granulométrie traduite par le d_{65} et non par le d_{50} ; on peut en conclure qu'une rampe de blocs uniformes bien calés les uns sur les autres nécessite, pour être détruite, un débit double du débit critique de début de transport que l'on observerait sur un lit mobile non pavé.

Synthèse

Un certain nombre de travaux ont été faits en laboratoire. Pour l'utilisation pratique, on doit pouvoir utiliser l'une ou l'autre des formules exposées précédemment. Pour tenir compte de l'effet d'armature du lit, on peut utiliser l'équation de Rickenman.

Il n'en reste pas moins que les essais en laboratoire, d'où sont tirées les équations de seuil de début de transport, ne rendent pas exactement compte du comportement du lit réel d'un torrent, notamment sa variabilité, son histoire, sa structure. Il existe un écart entre la réalité et ces essais, l'utilisateur de ces formules doit toujours en tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

Les calculs de capacité de transport

On distingue généralement deux formes de transport solide, par charriage et par suspension (cf. § 2.1.1). À leur tour, les formules de prévision du transport solide peuvent décrire soit le transport par charriage, soit le transport en suspension, soit le transport total (charriage + suspension). Selon Cardoso (1994), le grand nombre de formules disponibles est le symptôme de leur absence d'universalité. En effet, les prévisions de ces formules varient considérablement parce qu'elles ne sont valables que pour les conditions spécifiques qui ont servi de base à l'établissement de leurs coefficients empiriques. Par conséquent, il est d'une grande utilité pratique d'identifier les meilleures formules pour les conditions d'écoulement et les caractéristiques des sédiments qui nous intéressent, sans oublier de préciser leur mode d'obtention et leur domaine de validité.

Champ des formules de transport

Les formules de transport solide par charriage ne s'appliquent qu'au mouvement des matériaux constituant le fond du lit d'un cours d'eau. Les matériaux transportés en suspension (matériau de lessivage) ont une concentration indépendante du débit liquide. Elle n'est pas accessible par le calcul mais on peut la mesurer par prélèvement d'eau.

Pour mettre en œuvre les calculs de capacité de transport, il faut sélectionner un tronçon où il y a, *a priori*, équilibre entre débits liquides, apports solides, granulométrie et pente. Cela exclut les zones de gorge, les affleurements rocheux et les lits fixés par des blocs provenant des versants.

Sur les rivières torrentielles, on choisit un tronçon librement divaguant, assez long pour que le calcul de pente soit valide et où il doit être possible d'effectuer sur le terrain des mesures de granulométries pertinentes.

Enfin nous rappelons qu'en hydraulique torrentielle, il faut distinguer un seuil de début de transport (qui jouerait seulement sur les matériaux déposés immédiatement mobilisables) et un seuil d'érosion du lit (plus élevé que le précédent).

Si le débit liquide n'est pas suffisant, il n'y a pas de transport. Lorsque le premier seuil est franchi, le débit solide dépend du volume disponible en dehors du matériau du lit pavé, il s'agit seulement du matériau venant des versants et du matériau déposé par une crue antérieure et facilement mobilisable.

Si le débit liquide franchit le deuxième palier, un deuxième réservoir de matériau devient disponible et on peut admettre qu'il est suffisant pour que le maximum de matériau solide soit transporté : on est alors à la capacité maximale de transport.

Il est important de préciser que les formules que nous allons présenter ici ont toutes été obtenues en laboratoire dans les conditions de la capacité maximale de transport, et qu'il est donc préférable de les utiliser dans ces conditions.

Considérations sur le transport solide à forte pente

Des résultats des études sur modèles réduits physiques, Meunier (1991) a dressé un certain nombre de considérations :

- la pente joue le rôle principal dans le transport solide ; son effet sur la concentration se traduit par une fonction puissance avec un exposant qui varie entre 1,5 et 2 ;
- le seuil critique de début d'entraînement est souvent très faible par rapport à l'importance des crues (notamment par rapport aux crues de projet) ;
- la largeur du chenal et la forme de la courbe granulométrique jouent un rôle moins important que le débit liquide ;
- débits liquides et débits solides restent proportionnels si le matériau disponible est suffisant.

Les formules globales de capacité maximale de transport

Dans le cadre d'une étude sommaire sur le transport solide, et en considérant les points établis précédemment (prépondérance de la pente), on peut, pour les fortes crues, considérer que le paramètre principal est la pente. Il est alors possible de relier simplement la concentration (rapport du débit solide au débit liquide) à la pente par une des formules suivantes :

MEUNIER	$C = \frac{Q_s}{Q_l} = 65.5I^2$
MIZUYAMA	$C = \frac{Q_s}{Q_l} = 6.3I^2$
BATHURST	$C = \frac{Q_s}{Q_l} = 2.5I^{1.6}$
SMART et JAEGGI	$C = \frac{Q_s}{Q_l} = 2.5 \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) I^{1.5}$

La borne basse d'utilisation de ces formules simplifiées est située à une pente de l'ordre de 3 à 5 %. La borne haute correspond à une pente de l'ordre de 25 %. Il ne faut pas oublier que ces formules donnent la concentration à la capacité maximale de transport ; elles sont d'autant plus valables que le matériau est disponible sur une grande distance et remanié. Il est rare que ces conditions soient réunies, et en règle générale ces formules donnent une estimation par excès du transport solide.

Les formules plus complexes de capacité maximale de transport.

9. Formule SOGREAH (Meunier, 1991)

Utilisant de nombreux résultats d'essais sur modèle réduit, et en y ajoutant les résultats de SMART et JAEGGI, Lefort a calé une formule de transport solide à forte pente. Cette formule donne le débit solide total Q_s en fonction du débit liquide totale Q_l . Pour

relier ces deux variables, Lefort (1991) a utilisé une loi d'écoulement : la formule de Manning Strickler et une relation entre la largeur du chenal et la hauteur d'écoulement, la loi de RAMETTE. La formule obtenue est la suivante :

$$\frac{Q_s}{Q_l} = 4.45 \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \frac{\rho}{\rho_s - \rho} I^{1.5} \left[1 - \left(\frac{Q_{lc}}{Q_l} \right)^{0.375} \right]$$

$$Q_{lc} = 0.12 \sqrt{g d_{50}^5} I^{-13/6} (1 - 1.2)^{8/3}$$

Domaine d'application

- 0.2 % < pente < 20 %
- Lits naturels avec bancs de graviers ou peu rétrécis
- Diamètre > 1mm
- Ql/Qlc < 25

10. Formule de RICKENMANN

En domaine torrentiel, la formule de Rickenmann est fréquemment utilisée. Donnant un débit par unité de largeur, elle permet des calculs prenant en compte la largeur du lit, mais elle devient délicate d'emploi sur les tronçons à largeur variable dans le temps et dans l'espace.

$$\frac{q_c}{g^{1/2} d_{50}^{3/2}} = 0.65 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{1.67} I^{-1.12}$$

$$\frac{q_s}{q_l} = \frac{12.6}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{1.6}} \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} I^2 \left(1 - \frac{q_c}{q_l} \right)$$

Domaine d'application :

- 5% < I < 20 % ;
- (hm/d₉₀) < 20.

Ces méthodes de quantification sont issues de travaux en laboratoire, elles n'ont que rarement été validées par des mesures de terrain. Il existe donc un écart important entre les valeurs calculées par ces formules et la réalité. Le premier responsable de cet écart est, selon Meunier (1996), le bassin versant lui-même et le lit du torrent. Le premier n'est que rarement entièrement dégradé et le matériau du second n'est jamais suffisamment remanié pour que l'on puisse admettre que l'écoulement se fait à la capacité maximale de transport.

Les calculs de transport solide dans le modèle global spatialisé ETC du CEMAGREF

Nous avons présenté au § 0, les premiers modules du modèle global ETC, développé par le CEMAGREF, qui traite de la transformation de la pluie en débit liquide et de la pluie en débit solide. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux modules d'ETC qui traitent du routage du débit liquide dans les biefs et au mode de calcul du transport solide.

Pour le routage dans les biefs, l'hypothèse est que les écoulements se font toujours en régime torrentiel, ce qui permet de s'affranchir de l'influence de l'aval. La crue est

considérée comme une succession de régimes permanents. De même, les biefs sont des biefs uniformes, de pente constante. La propagation de la crue liquide dans un bief est une simple translation sans déformation, ce qui est admissible pour les fortes pentes.

Le transport solide est traité grâce à l'équation de continuité aux nœuds. Pour les biefs, l'organisation du module de routage du transport solide est représentée en Figure 35. Ce module traduit le fonctionnement des torrents dans le modèle. Le débit solide est d'abord comparé à la capacité maximale de transport :

- s'il est supérieur, le supplément est considéré comme devant se déposer. Il alimente ainsi un volume de sédiments accessibles à tout moment à l'érosion ;
- s'il est inférieur, l'écoulement s'alimente dans le volume de sédiments disponibles pour satisfaire sa capacité maximale de transport. Si cette réserve n'est pas suffisante, il y a possibilité d'érosion du lit du torrent lui-même par le biais d'une formule spécifique.

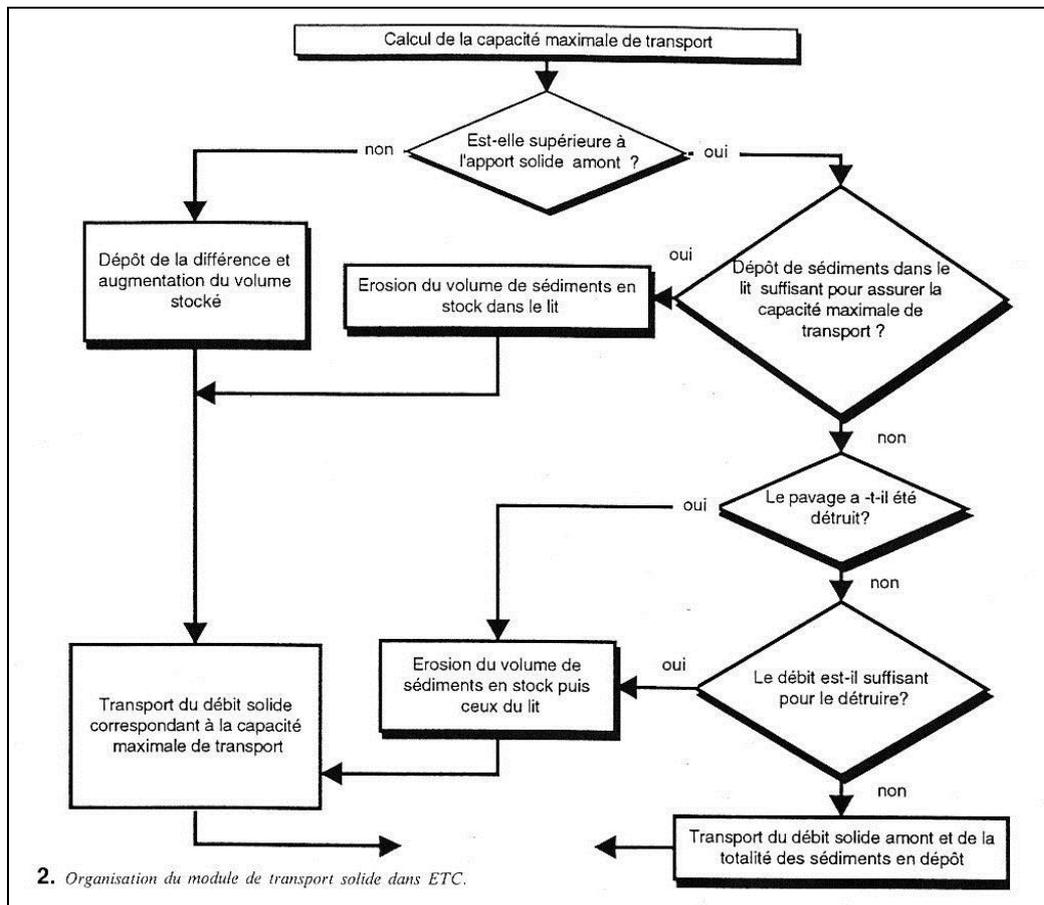


Figure 35 - Organisation du module de transport solide dans ETC (Brochot et al., 1998).

Ce modèle étant conçu pour représenter les comportements torrentiels, les formules de calcul utilisées pour le transport solide sont celles qui ont été obtenues à partir d'essais sur modèles réduits à forte pente (Borges *et al.*, 1994) :

- Formule de Smart et Jaeggi (établie en 1983) ;
- Formule de Rickenman (établie en 1990) ;
- Formule de Lefort (établie en 1991) ;
- Formule de dépavage de Bathurst (établie en 1987).

Chaque formule de transport solide a son propre seuil de début de transport. La formule de BATHURST a été introduite pour traduire le phénomène de dépavage. Cela donne la possibilité de séparer la loi d'érosion du lit de celle des dépôts. Ce modèle a fait l'objet de validation sur des bassins versants expérimentaux dans les Alpes du Sud. Les résultats présentés par les équipes du CEMAGREF sont encourageants. Ils ouvrent la voie à de nouvelles recherches, notamment en termes de mesure des quantités de matériau transités et de mesure de l'évolution des dépôts dans les biefs.

Les bilans volumétriques

11. Volume charrié lors d'une crue

Lors des crues exceptionnelles, le débit de début d'entraînement est très largement dépassé, et les incertitudes qui pèsent dessus sont estompées. En outre, dans les tronçons librement divagants, l'ensemble des matériaux disponibles a pu être mobilisé, après rupture de l'armure superficielle : on peut donc considérer le plus souvent que la capacité de transport a été saturée, à l'exception :

- des parties amont des bassins versants torrentiels, lorsque le lit est rocheux ;
- des tronçons à l'aval immédiat des points d'interruption du transit (barrages...) ;
- des cours d'eau totalement endigués, sans zone de mobilisation possible des alluvions.

Hormis dans ces cas, les calculs de transport solide peuvent être considérés comme assez fiables. On applique à l'hydrogramme de crue une des lois de transport solide proposée précédemment, en gardant toujours le souci de contrôler la pertinence du seuil de début d'entraînement.

En première approximation, on peut proposer une formule simplifiée pour évaluer rapidement l'ordre de grandeur des volumes charriés par une crue. L'hydrogramme de crue est supposé triangulaire (temps de base t_b et débit de pointe Q_{\max}).

La loi de transport est supposée linéaire, connue par le débit de début d'entraînement Q_{lc} et le débit solide correspondant au débit de pointe de la crue $Q_{s\max}$.

On a alors la relation :

$$V_S = \frac{t_b}{2} Q_{s\max} \left(1 - \frac{Q_{lc}}{Q_{l\max}} \right)$$

Selon l'agence de l'eau RMC, on a pu démontrer avec des relations de ce type que les opérations de curage des rivières décidées après une crue exceptionnelle dépassaient en volume ce que la crue pouvait charrier. L'utilisation de formules simplifiées de ce type permet une première évaluation rapide du volume charrié suite à un événement exceptionnel.

12. Bilan volumétrique global

Sur un tronçon donné, il peut être intéressant d'effectuer un bilan volumétrique sur une période donnée qui s'exprime ainsi :

$$\text{Volume vers aval} = \text{apports amont} + \text{variations du lit} - \text{extractions}$$

avec :

- volume vers aval = volume ayant quitté le tronçon ;
- apports amont = apports solides en provenance du bassin versant ;
- variations du lit = volume libéré par l'abaissement du lit (et/ou piégé par l'exhaussement) ;
- prélèvements = volumes extraits.

Ce type de bilan est plus particulièrement indiqué à l'amont d'une retenue où tout le transit a pu être piégé et ainsi être mesuré.

En théorie, il est alors possible de cerner les apports naturels du tronçon, que l'on mettra en relation avec la capacité de transport calculée. Ce serait un moyen de calage des formules mais les difficultés sont nombreuses :

- il n'est pas aisé de faire toujours la part entre charriage et suspension ;
- les volumes de dépôts mesurés dans les retenues contiennent des matériaux fins ;
- la relation entre volumes extraits autorisés et réels n'est pas toujours rigoureuse ;
- les volumes extraits sont, sur beaucoup de cours d'eau, supérieurs aux apports ; ces derniers sont alors de l'ordre de la marge d'incertitude sur les volumes extraits.

Annexe 3

État de l'art sur la modélisation du transport solide

Modélisation numérique en hydraulique fluviale

En hydraulique fluviale, même si des limitations existent, la modélisation du transport solide par des outils numériques est une méthode fiable et appliquée à de grands fleuves. Elle peut être utilisée ponctuellement pour modéliser la réponse du lit à un événement particulier, mais également pour simuler, sur une longue période, l'évolution du lit d'un fleuve suite à des aménagements.

La priorité, en ce qui concerne le développement des modèles numériques et de simulation pour ces études, est la mise au point de protocoles d'observations et de mesures. En effet, selon Belleudy (2001), ces modèles ont besoin d'être validés par des mesures de terrain.

Utilisation de modèles numériques en hydraulique torrentielle

Tous les modèles utilisés en hydraulique fluviale sont valables pour des nombres de Froude inférieurs à 1 et ont été conçus pour des sédiments fins et relativement uniformes. Le domaine de travail de l'hydraulique torrentielle est tout autre, et les modèles n'ont pas fait l'objet d'adaptation à des écoulements supercritiques où, en période de crue, les lits sont recalibrés à chaque instant.

En termes de pente, les modélisations menées sur des fleuves le sont pour des pentes généralement inférieures à 1 %, ce qui n'est plus le cas en hydraulique torrentielle où l'on s'intéresse à des pentes comprises en 2 et 20 %.

La modélisation mathématique dans le domaine de l'hydraulique torrentielle nécessiterait, pour être utilisée, des séries de mesure variées et importantes pour caler l'ensemble des paramètres qui interagissent. Le domaine des écoulements hyperconcentrés n'est pour l'instant pas accessible aux modèles mathématiques. Les recherches ne sont pas axées sur cet objectif car les étapes intermédiaires de quantification et de validation par des mesures de terrain sont prioritaires.

La seule utilisation actuelle de la modélisation numérique en hydraulique torrentielle concerne l'évolution des lits des rivières sur des longues périodes (chronique de 20 à 30 ans). Cela permet d'anticiper les évolutions futures en fonction d'apports de matériaux exceptionnels ou, au contraire, de déficit important.

Utilisation de modèles physiques

Justification de l'utilisation des modèles physiques

Les récents développements des études hydrauliques en matière d'aménagement des torrents ont radicalement évolué ces dernières années au point d'inverser l'ordre de prééminence des facteurs « **écoulement** » et « **charriage** » dans l'analyse du comportement des torrents en crue. Les modalités du transport solide ne sont alors

plus apparues comme un corollaire des conditions de l'écoulement liquide mais bien comme le phénomène déterminant essentiel, responsable des niveaux atteints et du principal danger pour les riverains (fréquemment, les variations du fond du lit, sous l'effet du charriage, sont bien supérieures aux hauteurs d'eau) (Couvert *et al.*, 1994).

Cette évolution s'est traduite dans les nouvelles formulations des lois du charriage solide qui relient le débit solide ou la concentration solide/liquide, non plus aux critères locaux de l'écoulement (débit solide en fonction de la hauteur d'eau ou de la vitesse) mais aux caractéristiques globales (pente du lit et granulométrie des matériaux) du torrent.

Lois de similitude

La réalisation de modèles physiques d'écoulements (modélisation des conditions naturelles sur des canaux de dimension réduites) est rendue possible par l'utilisation de loi de similitudes.

Les conditions de similitude sont particulièrement favorables dans le domaine torrentiel (régime très turbulent, granulométries grossières, pentes élevées) et ne nécessitent pas de distorsion d'échelle ou de densité.

Description des modèles

Les modèles à transports solides recyclés permettent de choisir un système débit liquide / granulométrie / pente stable, et d'en déduire une relation débit solide - débit liquide injectée ensuite en amont du modèle, lors des études d'aménagement. Cette technique présente toutefois deux limites : elle suppose la permanence d'une loi débit solide / débit liquide et elle supprime le tri granulométrique, rendant imparfaite la formation du pavage. La volonté d'aborder les problèmes torrentiels en régime transitoire conduit à développer des modèles en circuit ouvert. Les outils utilisables sont l'hydrogramme liquide, et l'hydrogramme solide associé.

La représentation plus précise des différentes granulométries de matériaux permettent d'apprécier la dérive granulométrique, soit naturelle sur un cône de déjection, soit influencée par un aménagement.

Des outils spécifiques ont été adaptés au domaine torrentiel par la mise à disposition de plates-formes spécifiques, équipés de périphériques modulables et différenciés, soit pour l'étude d'aménagements ponctuels, soit pour les études d'ensemble.

Les apports des modèles

Selon Couvert (SOGREAH, 1999), les apports des modèles physiques à la connaissance du charriage torrentiel portent sur des phénomènes que le calcul ne sait pas encore appréhender :

- **la divagation** (réglage de la largeur des chenaux d'un lit alluvial, division des bras et divagation) ;

- **le pavage endogène** (constitué par les seuls matériaux charriés par le torrent), le pavage exogène (produit ou complété par des éléments des versants tels que les blocs). La représentation de ces deux types de pavage est un élément essentiel de l'étude.

Le pavage endogène : il existe toute une gamme de phénomènes relatifs à l'organisation des matériaux d'un lit torrentiel sous l'effet du charriage :

- le tri granulométrique, soit seulement pondéral en fonction de la pente, soit aussi lié à la forme des éléments ;
- le pavage proprement dit, qui découle du tri, c'est-à-dire l'arrangement des éléments superficiels pour une meilleure résistance à l'entraînement ;
- le façonnage du lit en marche d'escalier, ou en une succession de seuils et mouilles, associé ou non à une sinuosité latérale (équivalent du système de bancs pour une rivière torrentielle) ;
- l'apparition dans certains cas de langues de charriage, ou gonflement localisé du lit, évoluant à l'échelle des fortes crues uniquement.

Ces phénomènes, bien que mal connus, sont bien représentés sur les modèles réduits physiques si la granulométrie est respectée et si les cycles hydrologiques ont été bien simulés.

L'entraînement des corps flottants et des débris divers est un phénomène corollaire des crues torrentielles d'importance capitale ; or, il n'existe pas de moyen rigoureux de calcul prenant en compte ces phénomènes (problème d'obstruction, engorgement régressif...).

L'apport des modèles physiques dans **l'étude du charriage en régime transitoire**, notamment pour les conditions de dépôts dans les cônes de déjection, et pour les problèmes d'obstruction est indéniable. De plus, ces modèles sont utiles pour la conception d'aménagements dans le lit pour étudier la réponse du lit à des phénomènes d'obstruction, ce qui permet d'adapter les ouvrages en conséquence.

Conclusion

La mise en œuvre de modèles physiques est courante en hydraulique torrentielle et concerne principalement les études d'ouvrages et d'aménagements.

Néanmoins ces modèles physiques, par les tests d'aménagements effectués, par la variation des paramètres tels que la pente ou la granulométrie, apportent des données de calages et des conclusions sur les écoulements qui sont inestimables.

Annexe 4

Influence possible des aménagements anthropiques sur le transport solide

13. Les barrages réservoirs

Les barrages réservoirs de grande taille ne permettent jamais le transit de matériaux. Les matériaux en suspension et les matériaux de charriage sont piégés dans la retenue (Figure 36).

Une conséquence immédiate est une tendance à l'engravement du lit à l'entrée du réservoir, qui remonte vers l'amont et un envasement de la retenue dû aux dépôts des sédiments en suspension. L'exhaussement à l'amont de la retenue est inévitable et nécessitera des opérations de curage répétées. Le réservoir aura une durée de vie limitée du fait des dépôts de sédiment.

À l'aval du barrage, l'absence totale et durable d'apports solides conduit à une érosion progressive du lit où l'on constate souvent un phénomène de pavage.

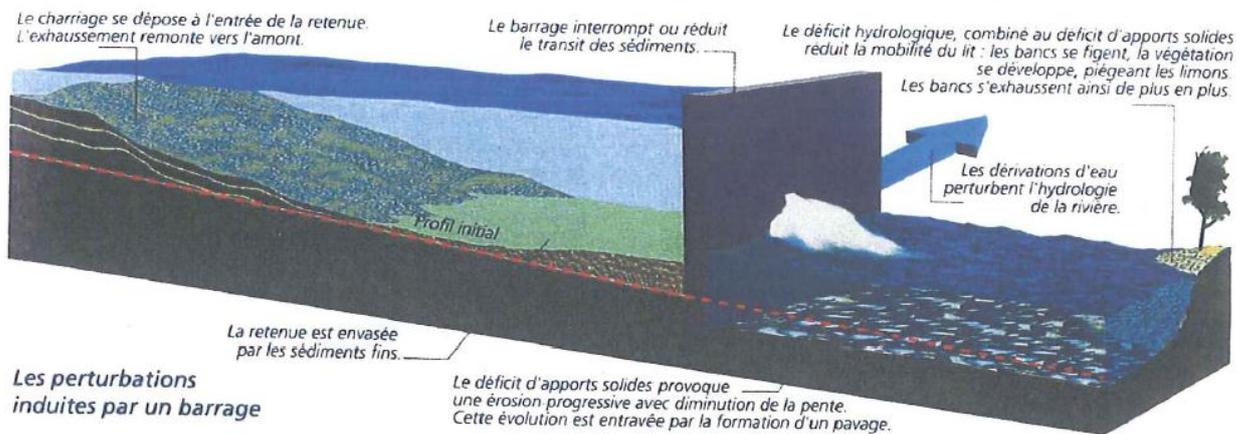


Figure 36 - Les perturbations induites par un barrage (Agence de l'eau RMC, 1999).

Les retenues de taille plus modeste peuvent avoir des répercussions différentes sur le transport solide, par exemple en stoppant le charriage sans arrêter les particules en suspension.

14. Les dérivations d'eau

La dérivation d'eau claire concerne les prises d'eau pour l'irrigation ou l'eau potable, directement en rivière ou dans une retenue.

La réduction des débits liquides dans le cours d'eau conduit à une réduction de sa capacité de transport solide. Du fait d'une moindre capacité de transport, il y a une tendance à l'exhaussement du lit, notamment au débouché des affluents chargés.

Une autre conséquence en termes de protection contre les crues est la réduction de la section d'écoulement, et donc, l'augmentation des risques d'inondations. Il est alors

nécessaire de régulièrement curer la rivière pour maintenir la capacité d'évacuation des crues.

15. Les restitutions d'eau claire

Les restitutions d'eau claire sont, comme l'illustre la Figure 37, le retour à la rivière d'un débit liquide prélevé à l'amont. Cet apport d'eau, sans apport de matériaux, augmente la capacité de transport de la rivière par augmentation du débit liquide. De ce fait, le lit va s'abaisser par érosion régressive et/ou on assistera à son pavage.

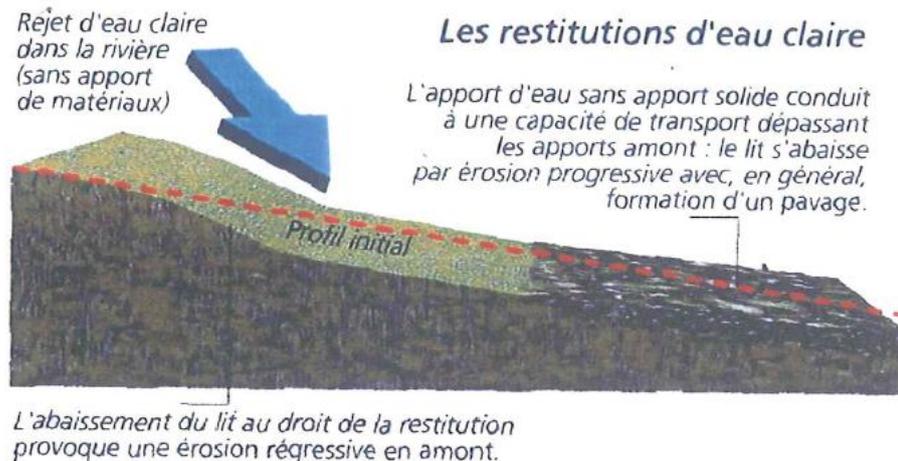


Figure 37 - Mécanisme de perturbation - les restitutions d'eau claire (Agence de l'eau RMC, 1999).

16. Les prélèvements de matériaux en lit mineur

Les prélèvements de matériaux en lit mineur concernent, soit des extractions de matériaux alluvionnaires, soit des opérations de dragage dont le but est l'entretien des cours d'eau et le maintien des capacités d'écoulement. Ces prélèvements entraînent un creusement du lit par rapport à la situation initiale (Figure 38).

Il y a donc une zone de plus forte pente à l'amont, avec accroissement de la capacité de transport, et une zone de plus faible pente à l'aval, avec réduction, voire suppression, de la capacité de transport.

La forte pente amont favorise une érosion régressive qui se propage vers l'amont. La faible pente aval favorise un ré-engravement de la zone perturbée associé à un déficit sédimentaire en aval.

L'exploitation intensive des granulats peut conduire sur certaines rivières à une mise à nu du substratum, ce qui peut bouleverser durablement la dynamique du lit. En effet, contrairement aux épaisseurs d'alluvions qui sont renouvelables au gré des apports de matériaux, le substratum ne pourra pas être renouvelé s'il subit une érosion. L'érosion du substratum est irréversible.

À l'inverse, un apport excessif de matériaux suite à une chute de blocs ou des glissements de terrain peut provoquer un engravement du lit, et donc augmenter les risques de débordements en diminuant la capacité d'écoulement du lit de la rivière.

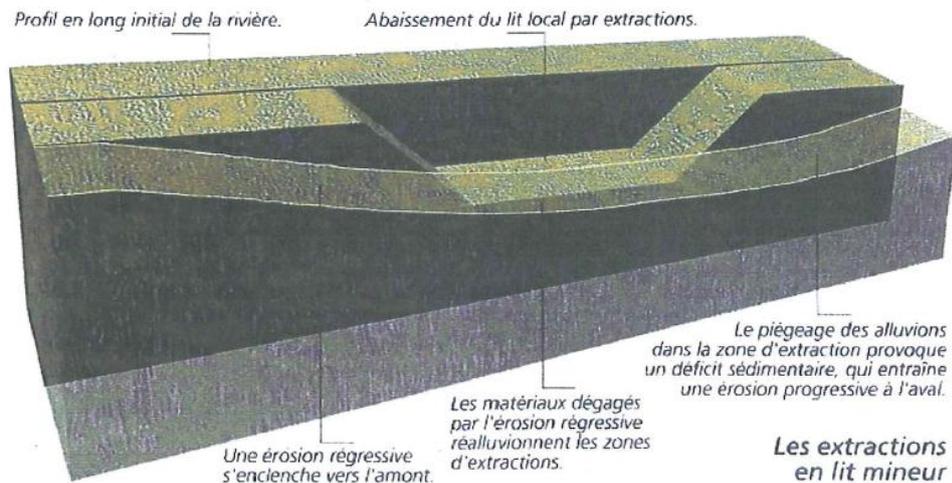


Figure 38 - Mécanismes de perturbation – les extractions en lit mineur (Agence de l'eau RMC, 1999).

17. Les prélèvements de matériaux en lit majeur

Ces prélèvements ont généralement lieu sous forme de souilles d'extractions à l'écart du lit mineur. Au terme de l'exploitation, les souilles d'extractions sont soit transformées en plan d'eau, soit partiellement remblayées.

Ces sites d'extractions peuvent avoir une incidence morphologique s'ils sont capturés par le cours d'eau ; deux modes de capture sont possibles :

- dans le premier cas, la berge qui sépare le lit du plan d'eau peut être directement attaquée par érosion latérale ;
- dans le second cas, le plan d'eau restant quasiment horizontal lors d'une crue débordante en raison de sa section importante, il s'ensuit une dénivelée entre le lit mineur et le plan d'eau au débordement, qui peut provoquer une érosion régressive de la berge du plan d'eau vers le lit.

Les coupures de méandres

Elles ont pour conséquences de créer des ruptures de pente avec érosion régressive en amont et atterrissement en aval (Figure 39).

18. Les endiguements

Si l'on restreint modérément la largeur de l'espace de divagation d'un cours d'eau, l'équilibre du lit n'est pas perturbé. En revanche, en dessous d'une certaine largeur, appelée seuil de confinement, la capacité de transport augmente légèrement.

L'effet de cette augmentation de la capacité de transport dans le lit endigué est un creusement du lit. À l'aval de l'endiguement, le volume dégagé par l'abaissement du lit dans l'endiguement provoquera un engravement du fond (Figure 40).

En amont de l'endiguement, deux tendances se contrarieront : abaissement du lit par érosion régressive et exhaussement du lit par élévation des niveaux due à l'endiguement aval. Le bilan dépend de la longueur du tronçon endigué et de l'importance du remous.

Cette analyse sommaire est mise en défaut lorsque la rivière n'était pas en équilibre.

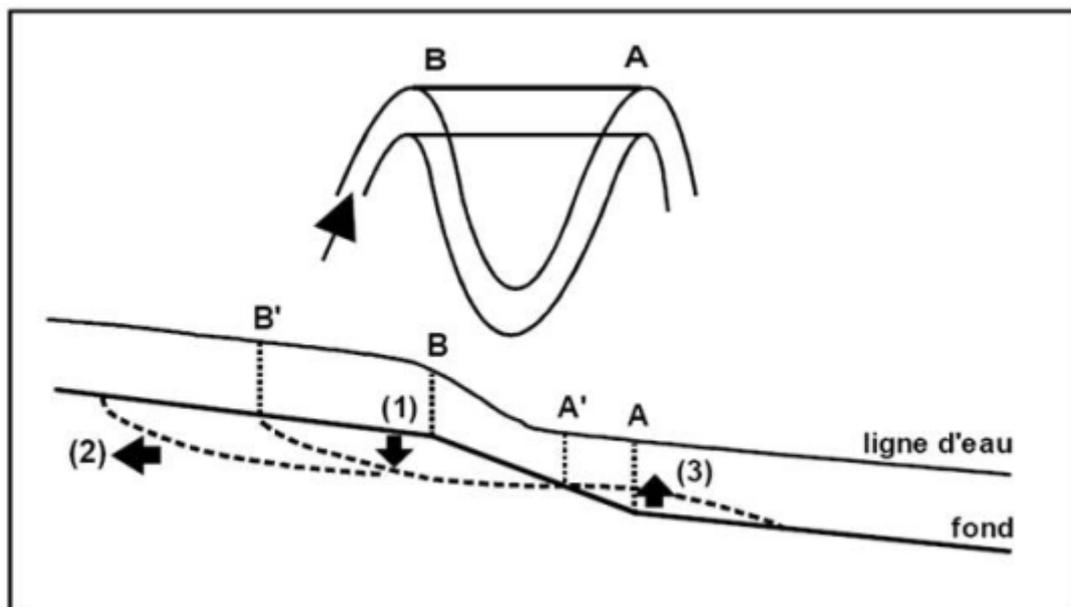


Figure 39 - Impact de la coupure d'un méandre.

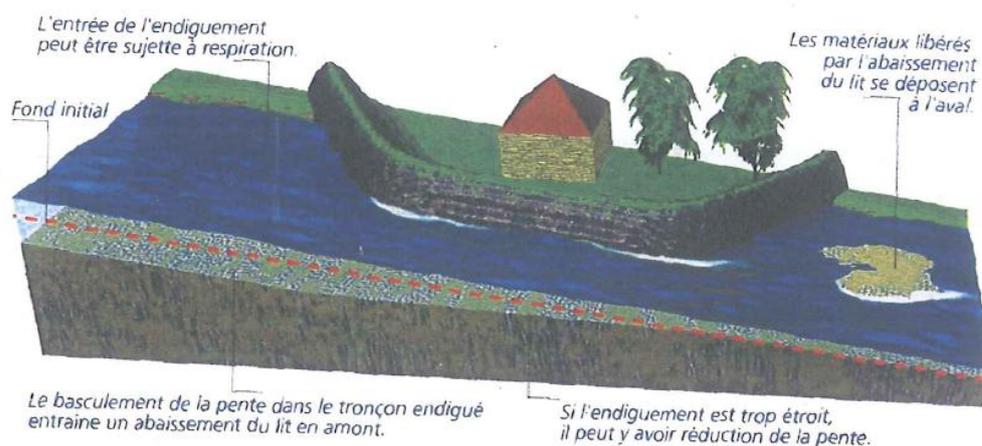


Figure 40 - Mécanisme de perturbation – effet d'un endiguement (Agence de l'eau RMC, 1999).

Annexe 5

Estimation des débits liquides en régime torrentiel

Hydrologie des bassins versants de montagne

L'hydrologie des bassins versants de montagne a connu un essor important avec la construction des grands barrages hydroélectriques. Depuis, son évolution est marquée par deux approches dominantes : la modélisation mathématique qui permet de décrire l'évolution temporelle des débits, et les recherches de terrain qui permettent d'identifier certains mécanismes physiques du fonctionnement des crues (Jordan, 1994). Ces deux approches sont complémentaires mais manquent souvent de coordination.

Du point de vue hydrologique, les bassins versants de montagne ont quelques particularités, principalement dues au relief et au couvert végétal. Ces éléments sont prépondérants dans la formation des crues et ont été développés chapitre 2.

La pluviométrie dépend en premier lieu des vents dominants et de l'altitude. Ce phénomène a été mis en évidence en Amérique du sud et en Afrique, les maxima pluviométriques des façades montagneuses tournées vers l'océan se situent sur les piémonts et bas de pente. En Polynésie Française, la pluviométrie dépend également de l'altitude et de l'exposition aux vents d'alizés. On observe que si l'altimétrie influence fortement la répartition des pluies, l'optimum pluviométrique ne correspond pas obligatoirement à la ligne de crête topographique, mais souvent à un effet de rempart, à mi pente.

Les phénomènes de crues

La genèse des crues

La complexité de la réponse du bassin versant aux précipitations est le résultat de nombreuses recherches de terrain qui ont conduit à identifier divers processus dans la formation des crues, schématisés sur la Figure 41.

Le ruissellement de surface est défini par la quantité d'eau de pluie qui ne peut plus s'infiltrer dans le sol. Ce type de ruissellement, né des déductions physiques d'Horton en 1933, a longtemps été considéré comme le mécanisme de formation des crues. Ce n'est que plus tard que des observations de terrain ont montré que les écoulements souterrains participaient directement ou indirectement à la formation des crues.

Le ruissellement par saturation correspond aux restitutions d'eau des zones saturées vers la surface. Ces zones saturées, appelées également surfaces de contribution, sont localisées au pied de versant, là où la capacité du sol à transmettre l'écoulement latéral n'est plus suffisante et où l'eau retourne, par conséquent, à la surface.

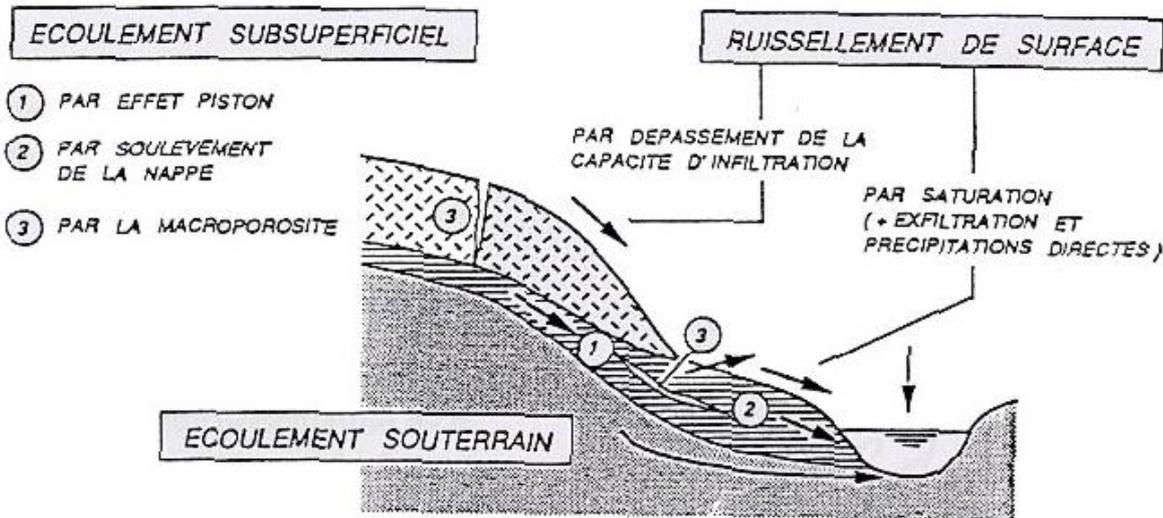


Figure 41 - Schématisation des processus de formation des crues (J-P Jordan, 1994).

L'**écoulement sub-superficiel** est scindé en deux mécanismes qui peuvent conduire à un transfert rapide de l'eau dans le sol, et participer ainsi à une crue : l'écoulement par la macroporosité tubulaire et celui par effet piston. La prédominance de l'écoulement par macroporosité est réduite à des cas particuliers où les vitesses de circulation sont grandes (fissures, fractures). Malgré les faibles vitesses mesurées dans le sol, l'eau peut arriver rapidement à la rivière pour participer à la crue par un effet « piston » : chaque impulsion de pluie déplace la quantité d'eau présente dans le sol et conduit à une réaction instantanée au pied des pentes (Jordan, 1994).

Crues et transport solide

Nous avons vu qu'il existe un seuil de débit à partir duquel les matériaux du lit se mettent en mouvement. Ce débit critique d'entraînement varie suivant les conditions dans lesquelles la crue se met en place.

La réponse du lit à une crue est donc différente au cours de son évolution. Koulinsky (1994), en vue de modélisations physiques en laboratoire, décompose une crue en trois phases aux conséquences bien distinctes en termes de transport solide :

- une période initiale durant laquelle les phénomènes s'installent et montent en puissance, la crue n'a pas d'influence sur le lit, il n'y a pas de charriage ;
- la période de crue proprement dite, au cours de laquelle la fourniture en sédiments est suffisante pour affecter en permanence l'emplacement des chenaux partiels d'écoulement et les débits globaux (solides et liquides). Ces changements sont plus rapides que les variations des apports. Ils se produisent par succession de périodes d'accalmie suivies de changements rapides.
- une période de décrue, au cours de laquelle les apports solides se tarissent, mais le débit liquide reste suffisant pour assurer, par tri granulométrique, le pavage du lit.

Ce schéma est simplifié mais il permet de mettre en évidence **la variabilité des phénomènes torrentiels**, à la fois dans le temps, avec notamment l'effet des débits moyens ou faibles de fin de crue qui permettent la formation de pavage, et dans l'espace pendant la crue (divagation incessante du lit).

Détermination des débits liquides

La prédétermination des débits de pointe et, plus généralement, l'étude des crues intéressent tout particulièrement les aménageurs. La prédétermination des débits de crue consiste à associer au dépassement d'un certain débit une probabilité d'occurrence. De nombreuses méthodes existent pour s'adapter au degré de disponibilité des données pluviométriques et hydrométriques. Nous présenterons ici, à titre indicatif, les plus courantes.

Les méthodes empirique de prédétermination des crues

Les formules empiriques sont multiples mais souvent d'une portée régionale. Les méthodes que nous allons présenter sont valables en France uniquement.

La méthode CRUPEDIX, établie en 1980 par le Ministère de l'Agriculture Français, est basée sur l'étude de 630 bassins versants pour lesquels le débit décennal a pu être évalué. Ce débit a ensuite été mis en équation en fonction des paramètres explicatifs suivants :

$$Q_d = S^{0.8} \left(\frac{P_{10}}{80} \right)^2 R$$

- surface S ;
- pluie journalière décennale P_{10} (mm/jour) ;
- coefficient régional R.

Cette formule a été établie pour une gamme de bassins versants allant de 10 à 2 000 km².

La méthode SOGREAH, établie en 1968 se base sur une synthèse des crues sur des bassins versants de 1 à 100 km². 105 stations hydrométriques ont été utilisées pour mettre en évidence les relations entre le débit décennal Q_{10} , la pente I en %, la surface S en km², la pluie décennale P_{10} en mm/jour, et un coefficient qui prend en compte la perméabilité des matériaux. Cette équation est résolue sous forme d'abaques.

La méthode SOCOSE, établie en 1980 par le Ministère de l'Agriculture Français est une estimation des débits de crues réalisée sur des petits bassins versants. Cette méthode a été calée sur 200 bassins de 2 à 200 km². Outre le débit décennal de pointe de crue Q_d en m³/s, la méthode SOCOSE permet d'évaluer la durée D durant laquelle le débit demeure supérieur à $Q_d/2$.

Les méthodes d'études hydrométéorologiques

Les méthodes d'hydrologie analytique sont basées sur l'étude fine du passage des précipitations aux débits. Ce passage est complexe puisqu'il dépend d'une multitude de paramètres : structure de la pluie, nature du bassin versant, degré d'humidité...

Ayant étudié ce passage, on peut soit étendre la série de crues à partir d'observations, soit le plus souvent, évaluer la crue de fréquence rare F à partir de la pluie de même fréquence que l'on présume être à son origine.

La première étape de ce passage consiste à définir la pluie nette, par une fonction de production. Il existe une multitude de fonctions, leur utilisation dépend de la disponibilité des paramètres explicatifs sur le bassin versant étudié ; à titre d'exemple, nous pouvons citer :

- la fonction S.C.S ;
- les méthodes à réservoirs ;
- les méthodes à réservoirs Diskin-Nasimov.

La deuxième étape consiste à répartir cette pluie nette dans le temps pour former l'hydrogramme, on utilise alors une fonction de transfert. Les plus utilisées sont :

- la méthode de l'hydrogramme unitaire ;
- les méthodes de résolution analytiques.

L'étude statistique des débits

Lorsque l'on dispose d'observations de débits de crue, ou des observations situées à proximité, il est possible de procéder à un ajustement statistique puis à une extrapolation sur les fréquences. Cette méthode est parfaitement justifiée si on dispose de suffisamment d'observations (10 ans au minimum). Cependant, il n'est pas raisonnable d'extrapoler l'ajustement statistique à des périodes de retour supérieures à 2 ou 3 n (n étant la durée d'observation).

Après avoir constitué un échantillon d'observations, le problème consiste à choisir le type de loi statistique à utiliser. Le plus souvent on procède par expérience en choisissant une loi *a priori*, puis en vérifiant *a posteriori* que ce choix n'est pas absurde. Les lois les plus couramment utilisées sont les lois de Gauss, Galton, Gumbel, Frechet, Fuller.

La méthode du gradex

L'ajustement statistique des débits de crue observés ne permet guère d'extrapoler qu'à des périodes de retour de l'ordre de 2 à 3 fois la durée d'observation. Pour l'estimation objective des crues de fréquence très rare, MM. Guillot et Duband de la Division Technique Générale de l'E.D.F ont proposé la méthode dite **du Gradex**.

Cette méthode est utilisée quand on dispose de longues séries pluviométriques, et d'une série de données limnimétriques. On fait l'hypothèse que la pluie suit une loi exponentielle type Gumbel. Pour les données de débits disponibles, on ajuste une loi sur les débits mesurés pour $T < T_g$ (appelé pivot). Pour $T > T_g$, on suppose que toute la pluie contribue au ruissellement et que la série de débit maximum suit une loi de Gumbel ayant le même Gradex que celui de la pluie. En général, T_g est de l'ordre de 10 à 20 ans.

Prédétermination régionale des débits de pointe

Cette méthode associe un générateur stochastique de pluies horaires et une modélisation simple de la pluie en débit. La méthode aboutit à des cartographies des débits de pointe de crue et des débits moyens pour différentes durées dans une gamme de fréquence large (période de retour de 2 à 100 ans). L'information, pixélisée au km^2 , est ensuite agglomérée à l'échelle du bassin versant, et permet ainsi de proposer des estimations de débits de crue en tout point du réseau hydrographique de la région étudiée. L'ensemble de cette information fait l'objet d'un système d'information géographique géré sous ArcView, ce qui assure une excellente convivialité et un bon confort d'utilisation (Lavabre *et al.*).

Loi de perte de charge

Les symboles utilisés dans ce paragraphe sont référencés et explicités dans la liste des symboles en p. 15.

Contexte

La formule de Manning Strickler utilisée en hydraulique fluviale, et valable en régime permanent uniforme, est souvent utilisée à tort en hydraulique torrentielle car elle introduit une fausse sécurité lorsque l'on s'en sert pour évaluer le débit écoulé par une crue réelle.

De nombreuses formules existent, qui tiennent compte des spécificités de l'hydraulique torrentielle, et qui permettent d'estimer la vitesse de l'écoulement torrentiel. On choisira celle la plus adaptée au cas traité, reconstitution de débit après une crue ou calcul de hauteur d'écoulement pour une crue de projet.

Le coefficient de rugosité dans les lois de pertes de charge usuelles en hydraulique fluviale peut s'exprimer de deux façons :

- Loi de MANNING-STRICKLER :
$$K = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} = \frac{\bar{U}}{R^{2/3} I^{1/2}}$$

- Loi de DARCY-WEISSBACH :
$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{\bar{U}}{U_*} = \frac{\bar{U}}{\sqrt{ghI}}$$

Deux problèmes se posent : pour quelles valeurs de pentes ces formules sont-elles valables ? Et comment faire intervenir la hauteur d'écoulement ? En effet celle-ci, suivant les auteurs, intervient sous la forme :

- soit d'une hauteur fictive d'écoulement liquide h_l ;
- soit d'une hauteur totale d'écoulement h_m ($h_m = h_l + h_s$).

Lois de pertes de charge faisant intervenir la hauteur d'écoulement h_m

Cette voie semble assez logique puisque la hauteur totale d'écoulement est directement accessible par l'observation. Meunier (1991) synthétise les formules les plus couramment utilisées :

- Formule de BATHURST *et al.* :
$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 5.62 \log\left(\frac{D}{d_{64}}\right) + 4$$

avec D profondeur moyenne de l'écoulement, $D = S/B$ avec B largeur au miroir.

- Formule de Rickenmann :
$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 1.25 \left(\frac{h}{d_{90}}\right)^{0.5} \frac{1}{I^{0.21}}$$

avec h = tirant d'eau du mélange (= h_m)

Cette formule est tirée de données *in situ* et de données de laboratoire

- Formule de BATHURST *et al.*
$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2.23 \left(\frac{h_m}{d_{90}}\right)^{0.35} \frac{1}{I^{0.29}}$$

Cette formule est tirée des données d'essai en laboratoire de SMART et JAEGGI.

Lois de pertes de charge faisant intervenir la hauteur fictive de l'écoulement liquide

Dans cette approche, on utilise la hauteur fictive de l'écoulement liquide h_l , composante de l'écoulement total, donnée par le rapport entre débit liquide et la vitesse moyenne.

- Formules de Meunier :

$$\frac{\bar{U}_l}{\sqrt{gd_{50}}} = 5.19 I^{0.5417} \left(\frac{h_l}{d_{50}}\right)^{0.7299}$$

$$\frac{\bar{U}_l}{\sqrt{gd_{90}}} = 5.677 I^{0.613} \left(\frac{h_l}{d_{90}}\right)^{0.84}$$

Ces formules sont tirées des données de SMART et JAEGGI.

Pour que cette approche soit productive, il faut pouvoir passer de la hauteur fictive d'écoulement de débit liquide, à la hauteur totale de l'écoulement par des coefficients de passage.

- Formules de Smart et Jaeggi :
$$\frac{h_m}{h_l} = \frac{1}{1 - 1.64I^{0.42} \left(\frac{q_s}{q_l} \right)^{0.63}}$$

- Formule de Meunier :
$$\frac{h_m}{h_l} = 9.65I^{1.7} \quad h_m = h_s + h_l$$

Ces formules donnent des résultats valables à plus ou moins 10 % sur h_m et à plus ou moins 40 % sur h_s pour la seconde formule sur les propres données de calage. Leur utilisation en dehors des conditions d'établissement de ces formules est donc incertaine (Meunier, 1991).

Liaison directe entre débit et vitesse

Takahashi a défini pour les laves torrentielles granulaires une liaison directe entre débit et vitesse, cette possibilité a été reprise par Rickenmann qui propose, à partir de ses essais :

$$\bar{U} = \frac{1.3I^{0.2} q_l^{0.6} g^{0.2}}{d_{90}^{0.44}}$$

L'utilisation de débit unitaire comme paramètre explicatif rend cette formule utilisable pour les aménagements lorsque le débit de projet est connu.

Synthèse

Ces formules sont tirées d'essais sur modèles réduits physiques avec transport solide et donnent, selon Meunier (1991), des vitesses supérieures aux vitesses constatées sans transport solide, sans que l'on puisse être sûr que l'écart ne provienne pas de la différence entre les protocoles de mesure. De manière générale, les formules présentées dans ce chapitre, si l'on exclut la formule de Manning Strickler sous sa forme classique de l'hydraulique fluviale, donne des résultats convergents. De nombreux auteurs insistent sur la nécessité de confronter ces formules à des validations et des mesures de terrain.

Annexe 6

Technique de mesures de la charge des rivières

Nous passons ici en revue les principales méthodes permettant de mesurer la partie du flux sédimentaire transportée en **charge de fond** d'une rivière. Les îles de la Polynésie étant sujettes à l'érosion torrentielle, lors d'événements climatiques de type cyclonique, nous nous intéresserons particulièrement aux méthodes qu'il serait envisageable de mettre en œuvre dans un tel cadre, en particulier celles qui auront pu être validées en contexte montagneux. Les autres méthodes, classiques ou non, et s'appliquant plutôt à des sédiments moins grossiers (sables et graviers), seront néanmoins mentionnées.

Mesure des sédiments en suspension

Ce type de mesure est beaucoup plus répandu que la mesure du charriage.

Nous rappellerons pour mémoire que cette mesure est généralement réalisée en prélevant des échantillons d'eau. Après filtration, les sédiments sont ensuite pesés et la concentration ainsi trouvée est affectée au débit mesuré lors du prélèvement. Ces prélèvements peuvent être réalisés manuellement ou à l'aide d'un préleveur automatique (pompage). Celui-ci pourra être à pas de temps constant ou asservi au débit. Vu la brièveté des crues, il est plutôt recommandé d'envisager l'installation d'un préleveur automatique.



Figure 42 - Exemple de préleveur automatique.

Pour mémoire, il est également possible d'utiliser, notamment en conduite ou en canal, un turbidimètre (fonctionnant au moyen de l'optique ou de la radioactivité) mais son emploi paraît plus délicat et moins aisé que par échantillons.

Mesure par piégeage

Échantillonneurs à filet

Les pièges les plus simples se présentent sous la forme de paniers, que l'on dépose au fond du lit de la rivière, l'ouverture tournée vers l'amont. Ces échantillonneurs dits

« *net-frame* » comportent un filet d'environ 25 L, monté sur un cadre rigide (par exemple en aluminium), typiquement de 20 x 30 cm², fixé dans le lit de la rivière (Figure 43). Le maillage du filet doit être suffisamment lâche pour ne pas perturber le courant, ce qui fixe par ailleurs la limite inférieure de la taille des grains recueillis (3-4 mm).

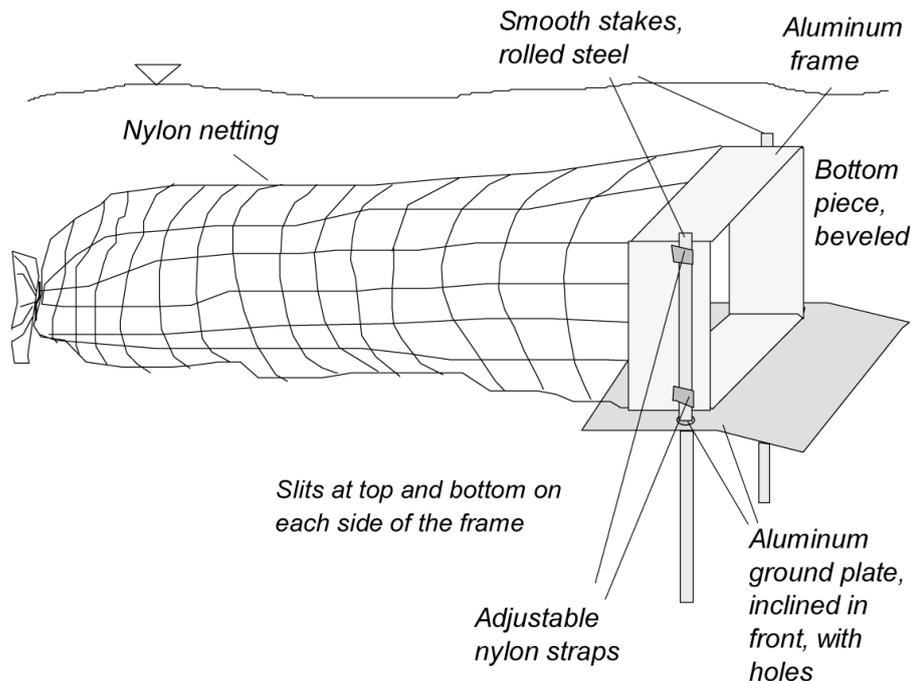


Figure 43 - Schéma d'un piège à sédiments de type « *net-frame* » (Bunte, 1998).

Cette technique présente l'avantage d'être peu coûteuse et facile à mettre en œuvre. Cependant, les inconvénients sont nombreux :

- la capacité des pièges étant d'environ 40 % de leur contenance (soit 10 L), il faut les vider régulièrement ; si l'opération peut s'avérer relativement facile dans une petite rivière à courant modéré (dans laquelle on peut marcher), elle se complique très vite dès que la hauteur d'eau ou la vitesse du fluide sont trop importantes ;
- l'échantillonnage est (de ce fait) forcément bref, de l'ordre d'une heure, souvent donc trop bref pour refléter le taux de transport moyen de la rivière (notamment des particules les plus grosses, dont la fréquence de transport est plus faible ; cf. Bunte and Abt, 2002) ;
- les sédiments récoltés sont triés par la largeur de l'ouverture du filet et par la taille de ses mailles ; la technique s'appliquera donc uniquement à la charge en graviers et galets ;
- dans certains contextes, des débris organiques peuvent s'accumuler dans les filets et les boucher.

La comparaison entre plusieurs méthodes semble indiquer que cette technique sous-estime probablement les taux de transport de graviers (Bunte and Abt, 2002).

Échantillonneurs Helley-Smith

Ce type d'échantillonneur ressemble au précédent dans la mesure où il recueille les sédiments dans un sac en nylon fixé sur un cadre, le tout disposé sur le fond du lit de la rivière, ouverture tournée vers l'amont. La particularité de l'échantillonneur Helley-Smith est d'être un système à pression différentielle¹ : le sac est monté sur une armature dont l'embouchure présente une section aval plus grande que sa section amont (dans un rapport pouvant être supérieur à 3), de telle manière que le courant ralentit à son passage dans cette embouchure (Helley and Smith, 1971 ; Figure 44 et Figure 45).



Figure 44 - Exemple d'échantillonneur Helley-Smith (US BL-84 bedload sample utilisé dans le cadre du Federal Interagency Sedimentation Project).

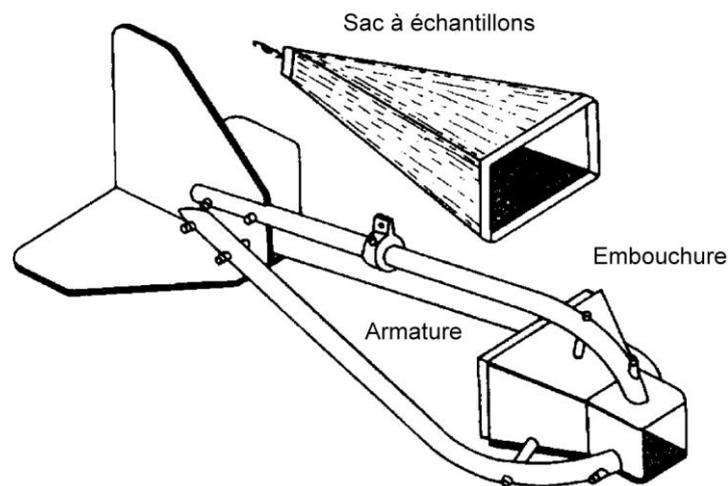


Figure 45 - Schéma d'un échantillonneur Helley-Smith (d'après Helley and Smith, 1971).

L'armature est en aluminium pour les échantillonneurs « standard » construits aux dimensions d'origine, *i.e.* avec une ouverture de 3 x 3 inch² (7,6 x 7,6 cm²). De plus

¹ En anglais : *pressure-differential type sampler*.

grands échantillonneurs ont été élaborés pour les sédiments plus grossiers (galets...), avec des armatures en acier ou en inox et une ouverture de 6 x 6 inch² (15,2 x 15,2 cm²).

Les sacs à échantillons font généralement environ 1 m de long, avec une taille de maille de 0,25 mm.

Les échantillonneurs Helley-Smith sont utilisés :

- à la main, en y fixant une poignée ou une perche (dans ce cas, l'armature en forme de poisson est souvent omise pour plus de maniabilité) ; les temps d'échantillonnage sont alors brefs, typiquement de 30 s à 3 mn ;
- descendus par un câble à partir d'un pont ou d'un câble porteur traversant la rivière, à la manière d'un téléphérique.

Des variations sont possibles sur ce schéma de dispositif : l'embouchure peut être choisie plus grande (6 x 12 inch²), l'armature stabilisante peut être d'une autre forme, plus ou moins lourde selon la maniabilité ou la stabilité souhaitée (Figure 46).



Figure 46 - Exemple d'échantillonneur dit « Toutle » (proposé par la Rickly Hydrological Company), fonctionnant suivant le même principe que les échantillonneurs Helley-Smith.

Les inconvénients du système précédent s'appliquent aussi à ce type de dispositif. En outre, les échantillonneurs Helley-Smith sont souvent moins maniables que les précédents, et la taille des sacs à échantillons est limitée par l'armature. De plus, les maintenir bien rectilignes dans le courant peut se révéler difficile, notamment lorsque celui-ci est très turbulent. C'est pourquoi certains échantillonneurs peuvent peser jusqu'à 80 kg (cas d'échantillonneurs portés par des câbles).

Échantillonneurs à fosse

Un échantillonneur à fosse² consiste en un trou (ou trappe) que l'on creuse dans le lit de la rivière, et que l'on bouche par une plaque dans laquelle un trou (une fente rectangulaire, ou un trou circulaire) est pratiquée pour laisser passer les sédiments. Le

² D'où l'autre appellation courante en anglais : *pit sampler*.

trou est étayé afin de ne pas se reboucher spontanément, et l'on y place un panier ou un sac pour recueillir les sédiments qui y tombent.

Le sac est régulièrement prélevé et son contenu analysé, informant ainsi sur la charge de fond qui a été mobilisée pendant la durée de l'échantillonnage.

La taille du piège et celle de son ouverture sont choisies dans la mesure du possible en fonction des résultats attendus.

Échantillonneurs automatiques à fente

Un échantillonneur automatique à fente³ (parfois appelé « de type Birkbeck », du nom de l'Université où le dispositif a été développé) est un système du type précédent, équipé de manière à effectuer une mesure de charge (masse de sédiments) en continu (Figure 47).

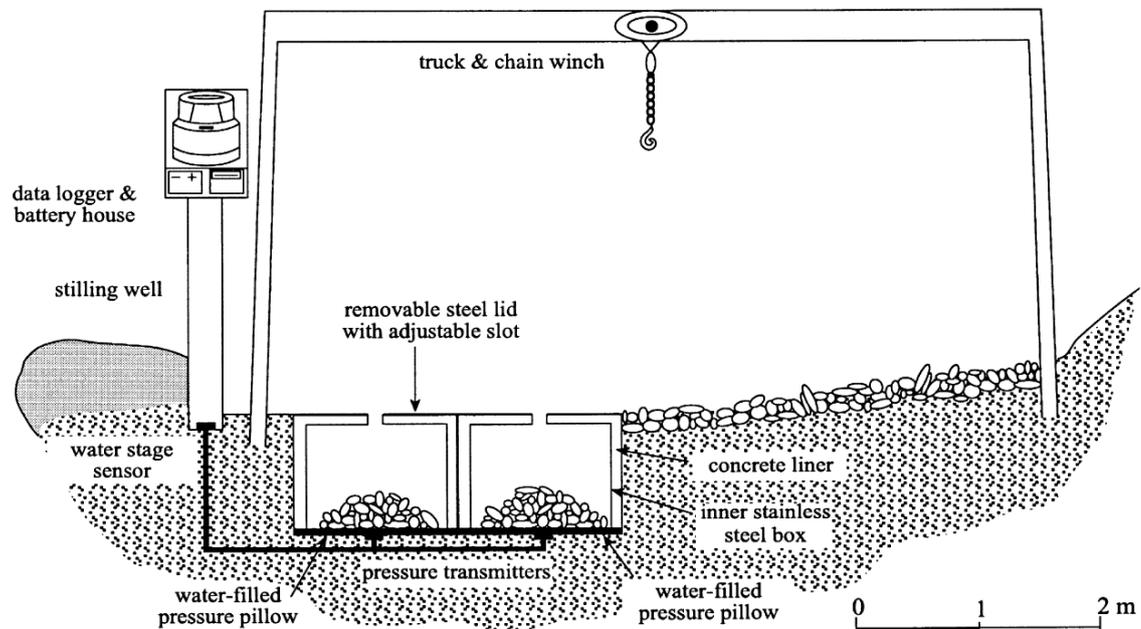


Figure 47 - Schéma (en coupe transverse à la rivière) d'une installation de mesure de la charge de fond par échantillonneur automatique à fente, d'après Garcia et al. (2000).

À l'intérieur de la fosse, la boîte réceptionnant les sédiments est posée sur un coussin (par exemple en Neoprène) rempli d'eau, relié à un capteur de pression. Un changement de pression mesurée correspond alors à une modification de la charge « boîte + eau + sédiments piégés ». Il convient donc de contrôler simultanément la pression de la colonne d'eau, par exemple à l'aide d'un capteur de pression analogue se trouvant au même niveau que le premier, mais dans un puits de mesure (Figure 48). Une autre solution consiste à mesurer directement la charge de la boîte à l'aide d'un

³ En anglais : *slot sampler*.

capteur de force indépendant de la hauteur d'eau (Figure 34, droite). Une calibration préalable est toujours nécessaire pour s'affranchir du poids de la boîte intérieure et de la dérive éventuelle de la charge qui en résulte.

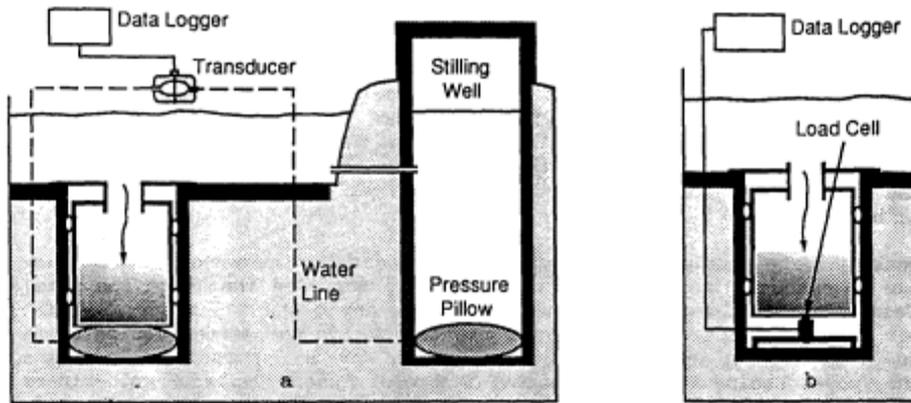


Figure 48 - Schéma des deux dispositifs possibles pour la mesure de la charge d'un échantillonneur automatique de sédiments, d'après Lewis (1991).

- a) un transmetteur de pression différentielle corrige le poids mesuré dans la trappe du poids de la colonne d'eau ;
- b) une cellule de charge mesure uniquement la charge en sédiments, indépendamment de la hauteur d'eau.

Pour éviter que la rivière n'affouille en aval de l'échantillonneur (dont le dessus est lisse et occasionne une accélération locale du courant), on le recouvre d'un tablier en ciment ou en bois.

La technique de mesure par « piégeage » s'applique à des rivières dont le taux de transport reste modéré puisque la contenance des fosses n'atteint pas 1 m^3 (voir par exemple Laronne *et al.*, 2002, pour une revue). Habersack *et al.* (2001) montrent d'ailleurs que l'efficacité hydraulique, qui qualifie la non-perturbation du liquide à l'intérieur de la fosse, diminue nettement à mesure que les sédiments s'y accumulent.

En outre, la largeur des fentes ne dépasse pas un maximum de 20 cm, ce qui limite sérieusement le champ d'investigation en ce qui concerne les rivières à érosion torrentielle.

Lors de l'utilisation d'un tel système, il faut prévoir de vidanger les fosses à une fréquence suffisante pour que les pièges ne saturent pas. Généralement, si l'opération n'est pas effectuée « à la main », un treuil monté sur un téléphérique permet de saisir à distance les paniers intérieurs. Un dispositif de pompage peut néanmoins s'avérer nécessaire si le flux de sédiments est important (e.g. Lewis, 1991).

Enfin, le taux de transport mesuré (forcément localement) à l'aide d'un tel système doit être rapporté à la largeur de la fente et correspond donc à un flux par unité de largeur. Cependant, la question de la représentativité de ce taux par rapport au taux de transport global de la charge de fond de la rivière (sur toute la largeur du lit) n'est pas clairement résolue.

Mesure à l'aide d'un système acoustique

La mesure par système acoustique permet la détection en continu du mouvement de la charge de fond, y compris pendant les événements de crues (e.g. Froehlich, 2002).

Le dispositif est le suivant : des tuyaux en acier de quelques mètres de long, 4 à 5 cm de diamètre, sont déposés au fond du lit de la rivière. Des microphones mesurent le signal acoustique généré par la percussion des graviers sur les tuyaux.

De manière générale, l'intensité du son augmente avec le taux de transport, et la fréquence du son est inversement proportionnelle au diamètre des particules en mouvement.

Le test d'un système analogue en canal expérimental (Barton *et al.*, 2003) permet de confronter le signal acoustique mesuré par des hydrophones au nombre de grains en mouvement calculé par vidéographie digitale (une caméra numérique filmant la charge en mouvement dans le canal installé dans un bac aux parois de verre). Ce dernier apparaît étroitement corrélé avec l'intensité du signal acoustique dans la bande 125-1600 Hz.

Un détecteur passif ultrasonique est proposé par Bogen and Møen (2002). Un capteur acoustique est fixé sur la face inférieure d'une plaque d'acier de 50 x 50 cm², elle-même fixée au lit de la rivière (qui doit donc être rocheux ; on peut également envisager de fixer la plaque sur un support rigide artificiel comme un barrage). Les particules glissant ou roulant sur la plaque génèrent des vibrations détectées par le capteur. Le signal acoustique résultant est filtré de manière à ne retenir que les fréquences situées dans une bande étroite ultrasonique.

Cette méthode n'est pas encore bien calibrée ni validée en ce qui concerne la charge de fond des rivières, mais elle dérive d'une technique développée pour mesurer la teneur en sable en suspension de l'huile tirée des réservoirs du plateau continental norvégien. Elle représente un compromis entre la méthode acoustique précédente et la détection d'impacts décrite au §0.

Mesure à l'aide de systèmes magnétiques

Utilisation de traceurs magnétiques

La technique des traceurs magnétiques consiste à insérer des aimants dans des trous forés dans des blocs et graviers puis scellés (Froehlich, 2002). Ce matériel est par ailleurs peint de manière à l'identifier visuellement, puis injecté dans la charge de fond grossière de la rivière. Un système électromagnétique (bobine de cuivre autour d'un noyau de fer) placé en aval agit comme un détecteur de métaux et mesure le passage des aimants : la présence de ceux-ci affecte le champ magnétique local, créant, du fait de l'inductance de la bobine, un pic de tension que l'on enregistre aux bornes de cette dernière. En choisissant des aimants de taille proportionnelle à celle des graviers dans lesquels ils sont introduits, on peut en outre connaître la granulométrie des éléments repérés.

Les expériences menées par Froehlich (2002) sur une rivière de moyenne montagne transportant une charge de taille médiane 64 mm montrent que les graviers parcourent de 5 à 140 m pendant la crue annuelle, les plus petits parcourant les distances les moins grandes. La recherche des graviers aimantés après chaque crue conduit à un taux de récupération de 12 à 85 %.

Utilisation des minéraux ferromagnétiques

Une autre technique consiste à se contenter des propriétés magnétiques des minéraux contenus dans les sédiments (Tunncliffe *et al.*, 2000). Une série de détecteurs magnétiques en forme de disque (de diamètre 8 cm, d'épaisseur 4 cm) est protégée par un habillage en aluminium et placée au ras du lit de la rivière. L'ensemble du système peut ainsi s'étendre sur plusieurs mètres de long, et s'appuie sur une armature ajustable de manière à pouvoir compenser les changements d'élévation du lit.

Les minéraux ferromagnétiques des particules qui passent au-dessus des détecteurs induisent des courants électriques de faible intensité, identifiable pour des grains de plus de 1 à quelques mm. La durée du signal induit est proportionnelle à la taille des grains et à la vitesse du transport.

Ce système est testé sur une petite rivière principalement alimentée par des eaux de fonte des neiges aux mois de mai et juin (Gottesfeld and Tunncliffe, 2002). Les sédiments transportés lors de ces crues (pic de débit à 20 m³/s) ne dépassent pas quelques centimètres de diamètre. La méthode permet essentiellement de compter le taux de particules passant au-dessus du système, mettant par exemple en évidence certaines phases de passages des sédiments par paquets. L'utilisation d'un grand nombre de détecteurs répartis sur toute la largeur du lit permet en outre de localiser les lignes de transport principales et de suivre leur évolution.

Autres méthodes

Traçage de cailloux peints

Une des méthodes les plus classiques de mesure du flux sédimentaire consiste à peindre des graviers et blocs que l'on injecte dans la rivière à un endroit donné (par exemple le long d'un transect du lit), et dont on observe ensuite la trajectoire (distance et temps de transport).

Le problème consiste en général à retrouver les cailloux, notamment après un épisode de crue qui risque de les avoir enfouis plus ou moins profondément. La meilleure solution est encore de les aimanter au préalable de manière à pouvoir les retrouver à l'aide d'un détecteur de métaux.

Radio-traçage de cailloux

On peut envisager de suivre à la trace un galet, naturel ou artificiel, équipé d'un radio-émetteur. La résolution temporelle maximale théorique du dispositif décrit par

Habersack (2002) est de 650 ms pour un galet. Un émetteur mesure quelques centimètres, et peut servir quelques mois d'affilée, selon la batterie utilisée. L'évolution technologique devrait rapidement permettre d'utiliser de plus petits appareils, de 1 cm de long, qui pourraient être implantés dans des sédiments moins grossiers (graviers).

Utilisation d'un détecteur d'impacts

Carling *et al.* (2002) suggèrent l'utilisation d'un système original, qui estime le mouvement des sédiments en détectant l'accélération d'une plaque d'acier fixée au substrat rocheux du lit de la rivière. Sous cette plaque (de 15 x 13 cm²) est fixé un appareil qui compte les impacts, protégé par un renforcement creusé dans la roche sous-jacente. Cette technique est bien sûr développée pour s'appliquer aux rivières à lit rocheux⁴, puisqu'il faut au système un point de fixation stable.

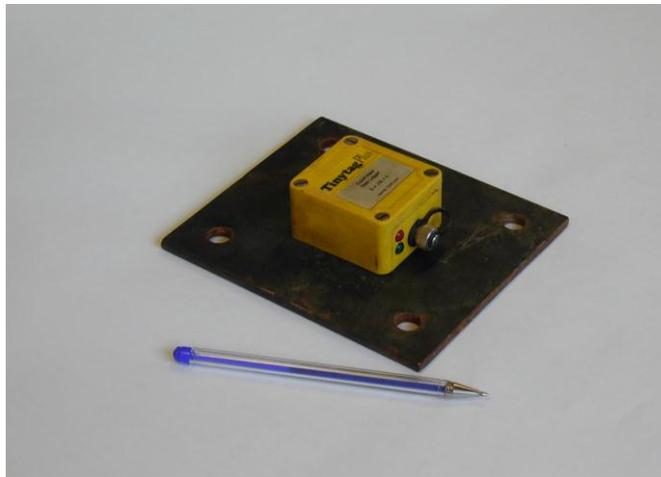


Figure 49 - Face inférieure du détecteur d'impacts de Carling *et al.* (2002), avec le compteur d'impacts fixé à la plaque recevant les impacts.

Les limitations d'un tel système sont surtout dues aux limitations du compteur : celui-ci ne peut compter qu'un certain nombre d'impacts par seconde, par exemple 3 dans le système de Carling *et al.* Ce nombre peut s'avérer insuffisant lors de crues torrentielles, conduisant à une saturation de la mesure. Cet inconvénient rend la réponse du système non-linéaire, puisque lorsque le taux de transport augmente, la probabilité que deux impacts soient trop rapprochés pour être identifiés tous les deux augmente également (plus le flux sédimentaire est important, plus il risque en outre d'être sous-estimé).

Par contre, la solidité de l'appareillage semble prouvée par une expérience décrite par les auteurs sur une rivière de Combrie (Royaume-Uni), lors de laquelle des blocs de plus de 1 m de diamètre avaient percuté la plaque. En outre, ce dispositif est peu coûteux.

⁴ En anglais : *bedrock rivers*.

Mesures d'affouillement

Les mesures d'affouillement fournissent une estimation de l'épaisseur de la charge mobilisée lors d'un événement érosif, mais ne renseignent pas sur le flux sédimentaire. Ces techniques sont notamment appliquées à des fins écologiques, lors d'études sur l'habitat des poissons (e.g., Nawa and Frissell, 1993 ; Carpenter *et al.*, 2001).

Chaînes d'affouillement

Les chaînes d'affouillement (Figure 50) permettent de mesurer la profondeur jusqu'à laquelle le lit de la rivière a été mis en mouvement à un endroit donné, et entre deux instants donnés (e.g. Nawa and Frissell, 1993). Une chaîne de métal est enfoncée verticalement dans le lit de la rivière, coupée au ras de la surface du lit, et ancrée à cet endroit, par exemple à une plaque métallique. Après un événement ayant occasionné du transport de fond (idéalement, une seule crue), on creuse pour retrouver la chaîne. Le fait que la chaîne ne soit plus verticale indique qu'il y a eu transport de sédiment ; la profondeur à laquelle elle fait un angle donne l'épaisseur sur laquelle il y a eu mouvement de sédiment, et, si l'ancre a tenu, on peut déterminer le changement d'élévation du lit.

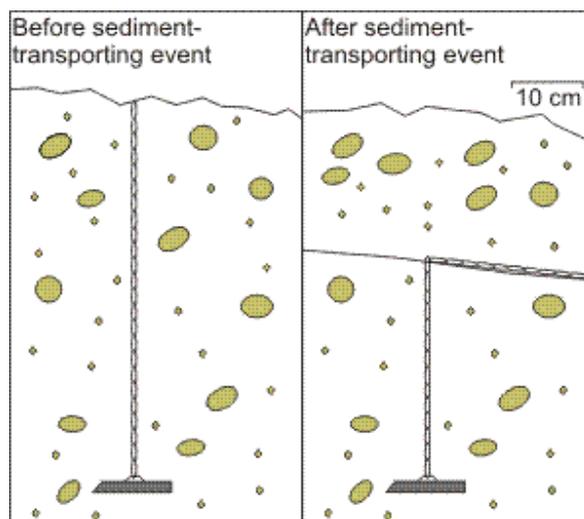


Figure 50 - Schéma illustrant l'utilisation de chaînes d'affouillement : le mouvement des sédiments du lit pendant le transport de la charge de fond pousse la chaîne horizontalement sur l'épaisseur de la charge mobile.

Toujours pour mesurer la profondeur d'affouillement, on peut avoir recours à un système de perles glissant⁵ le long d'un fil (Nawa and Frissell, 1993) : en période calme, on enfouit, dans les sédiments immobiles du lit, un fil sur lequel des perles sont enfilées (en plastique ; à l'origine, on utilisait des balles de ping-pong, ensuite abandonnées car trop volumineuses) ; ce fil est ancré à une profondeur supposée

⁵ En anglais : *sliding bead monitor*.

stable, à la manière des chaînes précédemment décrites (Figure 51). Lors d'un événement érosif, les perles se trouvant dans la charge mobilisée sont libérées et glissent à l'extrémité supérieure du fil. Après l'événement, le nombre de perles dégagées des sédiments témoigne de la profondeur de l'affouillement qui a eu lieu.

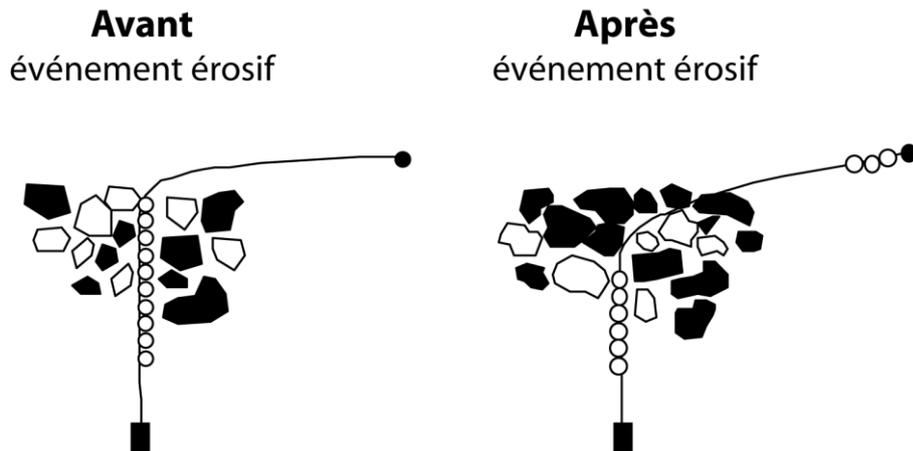


Figure 51 - Schéma d'un dispositif de mesure d'affouillement de type « perle glissante ». Les perles sont au départ toutes enfouies dans le lit de la rivière, tandis qu'après l'événement érosif, celles qui se trouvaient dans la partie affouillée ont glissé vers l'extrémité supérieure du fil.

Détection d'affouillement par mesure de pression

On peut envisager de mesurer l'affouillement à l'aide d'un capteur de charge⁶ enfoui dans le lit (Carpenter *et al.*, 2001).

Le dispositif consiste en un récipient en inox de la forme d'une plaque rectangulaire, recouvert d'un film en inox soudé à l'argent sur son périmètre (Figure 52). Un tuyau en inox est soudé à l'argent à une extrémité de cet assemblage, qui guide un capteur de pression glissé au fond du récipient rempli d'eau dégazée. L'ensemble constitue une cellule de charge que l'on enfouit horizontalement dans les sédiments du lit de la rivière, à une profondeur supérieure à celle de l'affouillement attendu, le film en inox étant placé sur le dessus. Le capteur de pression pèse la charge de la colonne de sédiments, d'eau et d'air qui s'applique au film en inox, et donc aussi à l'eau (quasi-incompressible contenue dans le récipient). Un second capteur, de pression de pore, situé en-dehors du récipient, pèse l'eau et l'air situés au-dessus. La différence des deux pressions mesurées donne le poids des sédiments recouvrant l'appareil. Après calibration et prise en compte de la masse volumique des matériaux et de la porosité du milieu, ce poids peut être traduit en termes d'épaisseur de sédiments.

Le détecteur, enterré dans un matériel sans cohésion, estime en fait le poids des sédiments contenu dans un cône d'angle $\sim 30^\circ$ (angle de friction interne) surmontant le film en inox.

⁶ En anglais : *load-cell*.

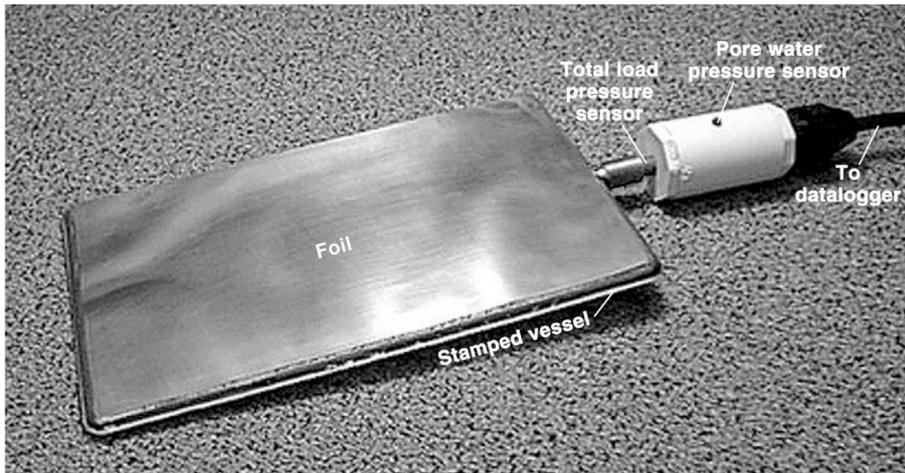


Figure 52 - Détecteur d'affouillement par mesure de pression.

Le capteur de charge (la plaque métallique) est couplé à un capteur de pression de pore (à droite), le tout étant relié à un enregistreur de données.



**Centre scientifique et technique
Service Risques Naturels**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34