ELABORATION D'UNE MÉTHODE DE PRÉDICTION DU VOLUME MAXIMAL D'UNE LAVE TORRENTIELLE (PREVENT)Géomorphologie torrentielle,Topographie de terrain et Stéréophotogrammétrie sur photographies aériennes d'archivesTorrents du Manival, du Merdarêt et des Arches (Alpes-du-Nord, Isère, France)

Stéphane Veyrat-Charvillon

▶ **To cite this version:**

Stéphane Veyrat-Charvillon. ELABORATION D'UNE MÉTHODE DE PRÉDICTION DU VOLUME MAXIMAL D'UNE LAVE TORRENTIELLE (PREVENT)Géomorphologie torrentielle,Topographie de terrain et Stéréophotogrammétrie sur photographies aériennes d'archivesTorrents du Manival, du Merdarêt et des Arches (Alpes-du-Nord, Isère, France). Géomorphologie. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2005. Français. NNT : . tel-00011428

HAL Id: tel-00011428

https://theses.hal.science/tel-00011428

Submitted on 19 Jan 2006

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

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

THESE

présentée par

Stéphane VEYRAT-CHARVILLON

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand 2
Discipline : Géographie Physique

ELABORATION D'UNE MÉTHODE DE PRÉDICTION DU VOLUME MAXIMAL D'UNE LAVE TORRENTIELLE

(PREVENT)

Géomorphologie torrentielle, Topographie de terrain et Stéréophotogrammétrie sur photographies aériennes d'archives

Torrents du Manival, du Merdarêt et des Arches (Alpes-du-Nord, Isère, France)

Date de soutenance : 9 décembre 2005

JURY :

Marie-Françoise ANDRE (Présidente)
Professeur de Géographie à l'Université Blaise Pascal, Clermont-Fd 2
Jean-Jacques DELANNOY (Rapporteur)
Professeur de Géographie à l'Université de Savoie
Lorenzo MARCHI (Examinateur)
Chercheur CNR IRPI (research institute for geo-hydrological protection), Padoue, Italie
Jean-Luc PEIRY (**Directeur de thèse**)
Professeur de Géographie à l'Université Blaise Pascal, Clermont-Fd 2
Hervé PIEGAY (Rapporteur)
Directeur de recherche au CNRS-UMR 5600 Environnement-Ville-Société, Lyon
Didier RICHARD (Invité)
Ingénieur en Chef du Génie Rural des Eaux et Forêts, Cemagref de Grenoble

A Janine

Je sais pourquoi tant de gens aiment couper du bois. C'est une activité où l'on voit tout de suite le résultat.

A. Einstein

Remerciements

Cette thèse est l'aboutissement d'un travail de plusieurs années de recherche mené conjointement au Cemagref de Grenoble et au laboratoire de géographie physique, Géolab, de Clermont-Ferrand. Cette période fut une riche expérience humaine qui s'est déroulée dans des sites magnifiques des Alpes du Nord. Outre le cadre agréable pour la vie au quotidien, la proximité géographique avec mon terrain d'étude s'est révélée être un atout considérable sur le plan de l'observation scientifique. Je pense que cette proximité fut indispensable pour mener à bien certaines approches proposées dans ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier **Jean-Luc Peiry**, professeur à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, pour avoir dirigé ce travail. Grâce à ses critiques et ses conseils, j'ai pu acquérir une certaine rigueur dans l'approche scientifique, qui s'avère être de plus en plus nécessaire en géomorphologie où la quantification des phénomènes prend actuellement une place importante. Je salue également son soutien et sa rigueur envers mon travail durant tout ce cheminement, malgré l'éloignement géographique et le peu de temps que lui laisse l'enseignement… J'ai aussi une pensée pour **Jean-Paul Bravard**, professeur de Géographie à l'Université Lumière de Lyon, qui a fortement inspiré mon intérêt pour la géomorphologie lors de ses cours en Ingénierie de l'Espace Rural.

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans une volonté d'ouverture politique du Cemagref de Grenoble souhaitant travailler en collaboration avec des géomorphologues. Je me dois de remercier à ce titre **Sylvie Brochot**, ingénieur du Génie Rural des Eaux et Forêts, à l'époque responsable de ce travail au Cemagref. Mon séjour de plus de trois années au sein de l'Unité de Recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches (ETNA), m'a permis de débuter ce travail dans un cadre agréable et dans de très bonnes conditions matérielles. J'en remercie tous les membres de cette équipe et en particulier **Didier Richard**, ingénieur en Chef du Génie Rural des Eaux et Forêts, chef de l'unité ETNA. Ma pensée va également à beaucoup de personnes d'autres unités de recherche du Cemagref de Grenoble qui m'ont rendu de nombreux services, chercheurs ou personnels administratifs, dont je n'énumérerai pas la liste ici, en les priant de bien vouloir m'en excuser. Je garde de bons souvenirs du quotidien passé au Cemagref avec mes amis grimpeurs et non-grimpeurs (nombreux stagiaires, doctorants, et autres personnels souvent de passage).

Mon choix scientifique d'utiliser des photographies aériennes, source de données les plus fiables et les plus objectives, a été payant au vu des résultats obtenus. Mais ce choix m'a entraîné dans la maîtrise et l'utilisation de la stéréo-photogrammétrie, technique pointue qui m'a été accessible grâce à la compétence et à la générosité de quelques personnes. Je tiens donc à remercier tout particulièrement **Michel Mémier**, docteur en Mathématiques et dirigeant du cabinet de Géomètres-Experts Sintégra à Meylan, qui m'a appris les concepts de base de la photogrammétrie et m'a offert son soutien et son expérience pour effectuer les mesures de chenaux torrentiels à partir de photographies d'archives. Je

suis heureux que notre publication dans *Earth Surface Processes and Landforms*, concrétisant notre travail commun, ait pu aboutir. **Christelle Brisa**, ingénieur photogrammètre à Sintégra, a effectué une partie des mesures. Les mesures photogrammétriques que j'ai effectuées seul ont été permises grâce au développement et à la mise à disposition gracieuse du restituteur numérique Anaglihr Poivillier E., logiciel de PC, par **Yves Egels**, ingénieur en Chef Géographe à l'Institut de Géographie National et professeur à l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques. Mes sincères remerciements vont aussi à **Johan Piedfort**, dirigeant du bureau d'étude Piedfort Photogrammétrie à Lausanne, pour son accueil chaleureux et surtout pour m'avoir gracieusement scanné tous les films dont j'avais besoin, à l'aide de son scanner à rouleaux de haute technologie et à sa grande expérience, et à **Thierry Villemin**, maître de conférence à l'Université de Savoie, qui m'a accompagné sur le terrain avec le matériel de son laboratoire pour effectuer des levés GPS précis. Je suis également reconnaissant à Monsieur **Mallaquina** de l'IFN de Lyon, qui m'a grandement facilité l'acquisition de diapositives de missions aériennes.

Dans ce travail, la disponibilité des documents d'archives du service de la RTM de l'Isère a été primordiale. Merci donc aux ouvriers, techniciens et ingénieurs de ce service que j'ai rencontrés, et tout particulièrement à **Pascal Diot**, Technicien de Secteur, tenancier du camp de base du Manival.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux personnes qui ont bien voulu évaluer ce travail :

- **Marie-Françoise André**, professeur de Géographie à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, a accepté d'examiner cette thèse ;
- **Jean-Jacques Delannoy**, professeur de Géographie à l'Université de Savoie, et **Hervé Piégay**, directeur de recherche au CNRS, ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse ;
- **Lorenzo Marchi**, Chercheur au CNR à l'IRPI (institut de recherche pour la protection géo-hydrologique) de Padoue en Italie, a été examinateur.

Les expérimentations géophysiques de terrain ont été permises grâce à la collaboration de géologues que je remercie d'être venu avec moi sur le terrain : **Pierre Desvarreux**, Professeur associé de l'Ecole Polytechnique de Grenoble et dirigeant du bureau d'étude Société Alpine de GEotechnique (SAGE), **Denis Fabre** et **Bernard Couturier**, professeurs à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble.

Certaines données hydrométéorologiques m'ont été fournies par **Philippe Bois**, professeur émérite de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, **Charles Obled**, professeur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, et aussi **Bernard Lesaffre** du Centre d'Etude de la Neige de Grenoble, que je remercie.

Je dois également exprimer toute ma reconnaissance vis-à-vis des nombreuses personnes qui ont bien voulu m'accompagner lors des multiples relevés et observations de terrain : la liste est longue parmi les

stagiaires de passage au Cemagref, techniciens ou chercheurs tous aussi sympathiques que curieux. Une mention toute particulière doit être dédiée aux stagiaires de troisième cycle que j'ai encadrés, **Jean-Luc Desplanches**, **Mickaël Bouvet**, **Franck Serouge**, et surtout **Nicolas Le Méhauté** avec qui j'ai eu des discussions sur la méthodologie très enrichissantes. Un grand merci également à **Estelle Ployon** pour ses conseils et ses très bonnes critiques tout au long de ce travail, en espérant qu'elle ne garde pas un trop mauvais souvenir des journées de terrains effectuées dans des conditions, je dois le reconnaître, bien difficiles.

Merci à **Franck Lavigne**, maître de Conférence à l'Université de la Sorbonne à Paris, grâce à qui j'ai passé de très bons moments en Indonésie tant sur le plan professionnel que personnel.

Je tiens à saluer les collègues avec qui j'ai passé d'agréables moments lors de mon intermède d'une petite année d'enseignement au lycée du CFMM (Centre de Formation aux Métiers de la Montagne) de Thônes. Quant à mes collègues actuels du laboratoire EDYTEM de Chambéry, qui m'accueillent pour cette seconde année d'ATER au CISM (Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne), je tiens à tous les remercier pour l'ambiance et la dynamique de travail très agréable qu'ils savent générer quotidiennement.

Je souhaite également saluer ici ma famille, qui avant le bac me poussait à poursuivre des études… un peu fort peut-être pour que j'aboutisse à un cursus aussi long! Merci pour son soutien.

Enfin, ce long travail a été grandement facilité par la présence permanente à mes cotés de ma meilleure alliée, qui a bien voulu me suivre dans les torrents les plus hostiles, courir devant un lahar en furie, et surtout avoir la patience de supporter la longue élaboration de ce travail avec toutes les phases ingrates qu'elle a pu comporter. Elle est certainement devenue une des meilleures expertes en lave torrentielle, bien malgré elle. Merci à toi **Janine Roussel**, à qui je dédie cet ouvrage.

Table des Matières

Remerciements 5
Table des Matières 9
Introduction générale 15

PREMIERE PARTIE - Problématique : comment prédire le volume sédimentaire des crues torrentielles ? 19

Chapitre 1. Le torrent : des connaissances empiriques 21

1.1. Problème du risque torrentiel pour les sociétés 21
1.1.1. L'évolution sociale face aux risques naturels 21
1.1.2. L'évolution de la prise en compte du risque torrentiel 22
1.1.3. L'ampleur des dépôts sédimentaires lors des catastrophes torrentielles 23

1.2. Spécificité des systèmes torrentiels au sein du système fluvial 25
1.2.1. Le bassin versant torrentiel 25
1.2.2. Le torrent 26

1.3. Spécificité du torrent vis à vis des transports solides 28
1.3.1. Les différents types de charriage : des écoulements biphasiques 28
A. Distinction des transports solides dans les rivières et dans les torrents 29
B. Particularités du charriage torrentiel 30
1.3.2. Les laves torrentielles : des écoulements monophasiques 30
A. Terminologie des laves torrentielles 31
B. Définition des laves torrentielles 33
C. Description d'une bouffée de lave torrentielle 39

1.4. Incidence des modes de transports spécifiques sur la géomorphologie torrentielle 39
1.4.1. Les formes liées aux charriages torrentiels 39
1.4.2. Les formes liées aux laves torrentielles 42

Chapitre 2. Les concepts du fonctionnement torrentiel 48

2.1. Complexité du transport solide au sein du système torrentiel 50

2.2. Représentation conceptuelle du fonctionnement de la dynamique sédimentaire 51
2.2.1. Limite de stabilité au sein du bassin versant 51
A. Les paramètres physiques : facteur de prédisposition permanent. 51
B. Les variables sédimentaires : facteur principal d'instabilité. 52
C. Les variables hydrométéorologiques : facteur ponctuel et temporaire d'instabilité 52
2.2.2. Les facteurs du déclenchement des transports solides : deux grands types de torrents 53

Chapitre 3. Avancées et limites de la modélisation du transport solide torrentiel 56

3.1. Outils de modélisation disponibles en ingénierie torrentielle 56
3.1.1. Modélisation des transports solides par charriage 56
3.1.2. Modélisation des laves torrentielles 56

3.2. Présentation des approches globales 57
3.2.1. Caractéristiques générales 57
3.2.2. Formules globales 58

3.3. Comparaison et analyse des formules globales 60

3.4. Limites des modèles globaux 61
3.4.1. Une utilisation régionale 61
3.4.2. Les problèmes de qualité des données 62
3.4.3. Les variations de l'activité torrentielle dans le temps 63
3.4.4. Le choix des données en fonction des échelles spatiales et temporelles étudiées 64

Chapitre 4. Proposition d'une nouvelle voie de recherche 65

4.1. Enseignements tirés de la modélisation conceptuelle et hypothèses de travail 65

4.2. Objectifs poursuivis 66

4.3. Terrain d'étude : le bassin expérimental du Manival 67
4.3.1. Le choix du bassin versant 67
A. L'activité torrentielle 67
B. Les données disponibles 68
C. L'accessibilité 68
4.3.2. Les caractéristiques du bassin versant 69
A. Morphologie générale 69
B. Géologie et lithologie 71

C. La couverture végétale 73
D. Les conditions climatiques du bassin 74
4.3.3. Les travaux d'aménagement torrentiel et leurs impacts 74
4.3.4. Les difficultés du travail de recherche en milieu torrentiel 77
A. Peu de données disponibles 78
B. Un milieu hostile 79

SECONDE PARTIE - Méthodologie et outils de mesure pour la quantification d'un état sédimentaire du chenal 81

Chapitre 1. Outils d'acquisition des données topographiques 83

1.1. La stéréo-photogrammétrie 86
1.1.1. Présentation de l'outil 87
A. Définition 87
B. Historique et applications 87
1.1.2. Principes de la restitution numérique 89
A. Principe de fonctionnement 89
B. Restituteur utilisé : Poivillier E. 89
C. Procédé général d'utilisation 90
1.1.3. Précisions des mesures en photogrammétrie 94
1.1.4. Application méthodologique aux photographies aériennes d'archives du Manival 96
A. Mise en place du couple photographique de référence (1993) 97
Documents de référence 97
Mode opératoire de photogrammétrie : orientation interne 97
Orientation des images et mesure des points d'appui : orientation externe 97
B. Calage des autre couples diachroniques sur celui de 1993 101
C. Estimation de l'erreur de précision sur les photographies du Manival 103
D. Réduction maximum de l'erreur sur les mesures altitudinales au Manival 105

1.2. La topographie de terrain par nivellement et cheminement 107
1.2.1. Matériel utilisé 107
1.2.2. Méthode mise en œuvre : le cheminement topographique 110
1.2.3. Application au torrent du Manival : création d'un MNT précis du chenal 112
A. Définition et possibilités offertes par le MNT 112
B. Choix méthodologique d'un échantillonnage en transects transversaux. 113
C. Problèmes rencontrés lors du traitement des données pour élaborer le MNT du chenal 114

Chapitre 2. Collecte des données : les notions de profil en travers et de section d'ablation maximale 119

2.1. Profil en Travers d'Ablation (PTA) 120

2.2. La notion de Profil en Long d'Ablation (PLAN) et les hypothèses sur sa forme et sa position 121
2.2.1. Profil a (PLAN sup.) : hypothèse correspondant à une pente d'équilibre (ou de compensation) 122
2.2.2. Profil b : profil en long d'ablation maximale observée dans des conditions de déficit sédimentaire 122
2.2.3. Profil c (PLAN inf.) : hypothèse correspondant à une ablation maximale 124
2.2.4. Tentatives de validation des hypothèses (PLAN) par des expérimentations sur le torrent du Manival 125
A. Prospections géophysiques 125
B. Observations sur les photographies aériennes anciennes 126

Chapitre 3. Optimisation de l'échantillonnage topographique 129

3.1. Nombre de points de mesure par profil en travers 129
3.1.1. Typologie des profils en travers 129
3.1.2. Modélisation avec 4 points 131
3.1.3. Test d'erreur sur la modélisation 133

3.2. Equidistance entre les profils en travers 135

3.3. Calcul de volumes par la méthode des casiers sédimentaires 137

Chapitre 4. Synthèse de la technique d'échantillonnage mise en œuvre 139

4.1. Acquisition des données topographiques 139

4.2. Modalités d'échantillonnage 139

4.3. Optimisation de la collecte d'information topographique 140

4.4. Chaînes de traitements pour l'exploitation des données 141

TROISIEME PARTIE - Dynamique sédimentaire en milieu torrentiel : étude détaillée du bassin versant du Manival 145

Chapitre 1. Evolution de l'état de remplissage du chenal de 1963 à 2000 148

1.1. Résultats sur les volumes potentiels de sédiments stockés dans le chenal 148
1.1.1. Résultat global des états sédimentaires du chenal 148
1.1.2. Etat sédimentaire détaillé du chenal en 1993 150
1.1.3. Comparaison des différents états sédimentaires 152

1.2. "Respirations" sédimentaires du chenal : évolutions temporelles 154
1.2.1. Variations des volumes sédimentaires du chenal par casier sédimentaire 154
1.2.2. Amplitudes sédimentaires 158
1.2.3. Evolution des volumes pour 9 zones de chenal homogènes 159

Chapitre 2. Fonctionnement et apports sédimentaires dans le bassin de réception 163

2.1. Cartographie fonctionnelle des apports sédimentaires du bassin versant 163
2.1.1. Méthode de classification synthétique adaptée à la recharge sédimentaire 163
2.1.2. Représentation cartographique anamorphosée 167

2.2. Etude du ravin supérieur du Manival : rythmes saisonniers de la recharge sédimentaire 172
2.2.1. Localisation du site en tête de bassin 172
2.2.2. Mesures des variations sédimentaires du ravin 173
2.2.3. Influence des précipitations intenses sur les purges sédimentaires du ravin 176
A. Données pluviométriques relevées sur le bassin versant 177
B. Variabilité spatiale des précipitations orageuses 177
2.2.4. Compréhension des différents rythmes saisonniers du fonctionnement sédimentaire des ravins 185
A. Mesures et résultats des variations de volumes sédimentaires 185
B. Rôle et rythme saisonnier des précipitations sur l'évolution de l'état sédimentaire du talweg 187
C. Influence de la neige dans le transport des plus gros blocs. 189

Chapitre 3. Synthèse : prise en compte des phases d'instabilité et détermination d'indicateurs géomorphologiques pertinents 191

3.1. Analyse de la dynamique sédimentaire : tentative d'établissement de bilans sédimentaires 192
3.1.1. Informations disponibles permettant l'établissement de bilans sédimentaires 193
3.1.2. Alimentation sédimentaire du chenal 195
A. Origines principales des apports 195
B. Spécificités fonctionnelles des ravins de tête de bassin versant 197
3.1.3. Essai de bilans sédimentaires de 1963 à 2000 197
3.1.4. Rôle des facteurs hydrométéorologiques sur la recharge sédimentaire 208
A. Données utilisées 208
B. Analyse des données 209

3.2. Transits partiels de sédiments à l'intérieur du chenal : effets des micro-laves torrentielles de forte fréquence 217
3.2.1. Les micro-laves de masse 220
3.2.2. Les micro-laves fluides 220
3.2.3. Relais et transfert des matériaux dans le chenal : zones de Stockage POtentiel Temporaire de Sédiments (SPOTS) 220

3.3. Rôle primordial de la pente dans le fonctionnement sédimentaire 221
3.3.1. Localisation des zones de Stockage POtentiel Temporaire de Sédiments (SPOTS) dans le chenal 222
3.3.2. PREdiction des Volumes de l'EvéNement Torrentiel (PREVENT) en utilisant les biefs ayant une pente supérieure à 8° 225

QUATRIEME PARTIE - Application de la méthode de PREVENT 229

Chapitre 1. Choix de deux torrents du même type que le Manival : le Merdarêt et les Arches 231

1.1. Critères de sélection des bassins versants 231
1.1.1. Critères liés à la méthode 231
1.1.2. Critères liés aux informations disponibles nécessaires à la validation de la méthode 232

1.2. Présentation des bassins versants 232
1.2.1. Caractéristiques générales du bassin versant du Merdarêt. 232
A. Situation 232
B. Morphologie générale 233
C. Géologie et lithologie 233
D. Couverture végétale 236
E. Pluies extrêmes 236
1.2.2. Les transports solides du bassin versant du Merdarêt. 237
A. Evénements torrentiels connus 237
B. Aménagements de la RTM 238
C. Transports solides 238
1.2.3. Caractéristiques générales du bassin versant des Arches. 240
A. Situation 240
B. Morphologie générale 240

C. Géologie et lithologie 241
D. Couverture végétale 242
E. Conditions climatiques 242
1.2.4. Les transports solides du bassin versant des Arches. 242
A. Evénements torrentiels connus 242
B. Aménagements de la RTM 244
C. Transports solides 244

Chapitre 2. Application de la méthode PREVENT 246

2.1. Torrent du Merdarêt 246
2.1.1. Données utilisées 246
2.1.2. Résultats de la méthode PREVENT 246
2.1.3. Zones de SPOTS du chenal 249

2.2. Torrent des Arches 250
2.2.1. Données utilisées 250
2.2.2. Résultats de la méthode de PREVENT 250
2.2.3. Zones de SPOTS du chenal 252

Chapitre 3. Etude diachronique des événements contemporains sur les torrents étudiés 254

3.1. Torrent du Manival 254
3.1.1. Evénements récents depuis 1999 254
3.1.2. Etat des zones de SPOTS : un indicateur qualitatif 254

3.2. Torrent du Merdarêt 255
3.2.1. Evénement du 24 juillet 2000 255
A. Précipitations au cours de cet événement 255
B. Informations et les estimations du service de la RTM 255
C. Quantification du volume de l'événement à partir des mesures de terrain de l'été 2001 sur le Merdarêt. 256
3.2.2. Cohérence des résultats de la méthode de PREVENT 258

3.3. Torrent des Arches 259
3.3.1. Evénements contemporains de 1998 à 2001 259
3.3.2. Objectivité des résultats de la méthode de PREVENT 260

Chapitre 4. Critique et perspective de la méthode de PREVENT 261

4.1. Apports de la méthode 261
4.1.1. Nouvelle approche globale basée sur des concepts adaptés au fonctionnement des systèmes torrentiels 261
A. Méthode rapide et simple 261
B. Critères essentiels reflétant le fonctionnement du transport solide 261
4.1.2. Outils de mesure adaptés aux organismes torrentiels 262
A. Rapidité de mesure 262
B. Qualité des données 262
4.1.3. Perspectives méthodologiques d'une méthode évolutive 263

4.2. Limites de la méthode 265
4.2.1. Utilisation limitée à certain types de torrents 265
4.2.2. Incertitude liée à la méconnaissance du niveau PLAN de référence 265

4.3. Evolution vers un modèle 266

Conclusion générale 267

Bibliographie 271
Liste des Figures 297
Liste des Tableaux 305

ANNEXES 309

Annexe 1 - Traitement des mesures topographiques pour le calcul du volume des sédiments potentiellement mobilisables du chenal 311
Annexe 2 - Macro-commandes pour Excel (VBA) 317
Annexe 3 - Manuel du logiciel ANAGLIHR POIVILLIERS E 331
Annexe 4 - Classification géologique de Robert Marie 351
Annexe 5 - Fiche événement du 30 avril 1968 (Torrent du Manival - Service de la RTM) 353

Introduction générale :

Dans toutes les régions de montagne, les risques naturels ont toujours préoccupé les habitants. Le temps de la fatalité face à des événements parfois considérés comme surnaturels et diaboliques est révolu. L'objectif des gestionnaires du XIX^{e} et du XX^{e} siècle était de maîtriser et de dompter cette nature sauvage. Or en ce début de XXI^{e} siècle, force est de constater que les catastrophes naturelles sont encore bien présentes et elles pourraient même être de plus en plus fréquentes si l'on en croit les modèles du changement climatique global. Non seulement nous ne les dominons pas, mais il reste quasiment impossible de les prévoir ou de prédire les dégâts qu'elles pourraient occasionner. Les crues soudaines et dévastatrices des torrents, où pourtant la plupart du temps ne coule qu'un filet d'eau, sont bien placées au palmarès des catastrophes. Les exemples sont nombreux et les médias reviennent régulièrement sur des événements de crues torrentielles plus ou moins dramatiques, même dans les pays les plus riches. Pour ces derniers toutefois, il y a moins de victimes à déplorer dans l'ensemble. Il faut dire que l'évolution des sociétés qui maintenant désignent systématiquement un ou des responsables, maintient une forte pression sur les gestionnaires en charge de la protection contre les risques naturels.

Les gestionnaires n'ont pas tous la même connaissance des aléas torrentiels, suivant qu'il s'agisse de personnels du service de la Restauration des Terrains de Montagne (RTM), de bureaux d'études en charge d'expertises torrentielles, ou de collectivités territoriales. La plupart de ces praticiens s'appuient sur une approche empirique liée à leur expérience de terrain qui, jusqu'à présent, permet une gestion acceptable mais pas suffisante du risque. C'est particulièrement vrai pour les agents du service de la RTM, mis en place en France depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Pourtant pour d'autres, comme le personnel moins expert des collectivités territoriales par exemple, pouvoir s'appuyer sur des outils fiables permettant de prédire la magnitude d'une crue devient indispensable. On constate que les méthodes actuelles restent insuffisantes ; c'est pourquoi le travail de recherche présenté ici trouve tout son sens. Le volume de sédiments transportés par la crue est l'élément déterminant à connaître pour s'en protéger ; la particularité des crues torrentielles étant l'écoulement sous forme de lave torrentielle, plus couramment nommé par les médias et le grand public «coulée de boue», et qui peut transporter une quantité impressionnante de sédiments et de blocs de taille énorme.

C'est donc pour répondre à cette demande cruciale qu'est né notre travail de recherche : fournir une méthode ou un moyen permettant de prédire le volume de matériaux que peut apporter un bassin versant torrentiel à son exutoire. Ce travail a pu voir le jour grâce au rapprochement de deux types de méthodes complémentaires : l'approche de type ingénierie privilégiant la quantification et la modélisation, et l'approche géographique historiquement plus tournée vers la description et la compréhension des mécanismes. Ainsi, cette recherche a été menée à la fois au sein du Cemagref de Grenoble (Unité de Recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches) et du laboratoire de géographie physique de l'Université de Clermont-Ferrand (Géolab – UMR 6042 CNRS).

L'approche systémique en géomorphologie fluviale et torrentielle conduit à considérer la rivière ou le torrent comme un objet intégrateur de la diversité des contrôles environnementaux qui s'appliquent à l'échelle du bassin versant [Schumm, 1977]. L'état des formes du torrent à un instant donné est le produit d'une histoire complexe, faite à la fois d'ajustements lents et progressifs, et de changements brutaux. L'homme et le climat sont les principaux acteurs du système ; leurs actions se déroulent à des pas de temps différents et dans un contexte général qui peut soit amplifier, soit atténuer la réponse du torrent au jeu des acteurs [Liébaut, 2003]. Cette sensibilité est elle-même conditionnée par une longue histoire climatique et géologique qui s'exprime sous forme d'héritages. A l'échelle de temps décennale ou séculaire, même si ces héritages peuvent être considérés comme invariants, ils définissent toutefois un cadre spécifique qui influence la nature même des processus géomorphologiques actuels. Par exemple, les accumulations morainiques abandonnées par le recul des glaciers aux XVIII^{ème} et au XIX^{ème} siècles constituent une fourniture sédimentaire quasiment inépuisable pour le torrent. L'influence de l'homme et du climat sur les formes torrentielles s'exerce essentiellement par les modifications apportées aux flux liquides et au transport solide. L'étude de ces formes permet d'acquérir une connaissance approfondie du fonctionnement torrentiel par une démarche globale prenant en compte les emboîtements d'échelles spatiales et temporelles. C'est dans cette démarche que s'inscrit notre travail de thèse pour aboutir à l'élaboration d'une méthode permettant de prédire le volume sédimentaire transporté par les torrents.

Pour répondre à cette problématique, l'ouvrage s'organise en quatre parties qu'il sera difficile d'aborder de manière indépendante ; elles sont plutôt une succession d'étapes aboutissant à l'utilisation de la méthode élaborée :

En s'appuyant sur la littérature spécialisée, la première partie fait un état des connaissances actuelles tant sur les torrents, les crues et les laves torrentielles, que sur les modèles et outils disponibles en ingénierie. Cette vue d'ensemble permet de poser la problématique et de définir la méthodologie de recherche suivie. La fin de cette partie est consacrée à la présentation du torrent du Manival, considéré dans notre étude comme un bassin versant expérimental.

La seconde partie, plus technique, regroupe les outils et la méthodologie de mesure utilisés. Les premiers sont des outils de mesures topographiques permettant des approches à différentes échelles:

- la stéréophotogrammétrie sur des photographies aériennes d'archives,
- le levé topographique sur le terrain.

Quant à la méthodologie de mesure développée, elle est spécifique à la fois au chenal torrentiel et à notre problématique d'étude axée sur le transport solide.

La troisième partie constitue une étude détaillée du bassin versant du Manival permettant de comprendre la dynamique sédimentaire du torrent. Le cheminement des matériaux est abordé à travers une cartographie fonctionnelle des zones sources, un suivi précis des variations sédimentaires du haut-

ravin du Manival, des observations de terrain, et une analyse diachronique du remplissage sédimentaire du chenal torrentiel sur plusieurs décennies. Ces approches multiscalaires ont permis d'élaborer des bilans sédimentaires sur ce torrent. La participation des facteurs hydrométéorologiques a également été abordée. L'objectif de cette partie a été de déterminer les indices utilisables dans l'élaboration de la méthode de prédiction du volume de lave torrentielle (PREVENT).

Dans la quatrième partie, nous avons appliqué la méthode de PREVENT à deux autres torrents du même type que le Manival : le Merdarêt et les Arches. L'analyse diachronique d'événements contemporains permet ensuite d'aborder les avantages et les limites de cette méthode.

PREMIERE PARTIE
Problématique : comment prédire le volume sédimentaire des crues torrentielles ?

1. Le torrent : des connaissances empiriques
2. Les concepts du fonctionnement torrentiel
3. Avancées et limites de la modélisation du transport solide torrentiel
4. Proposition d’une nouvelle voie de recherche

Le travail présenté ici est le fruit d'une recherche appliquée dont la question posée, indirectement par les gestionnaires des risques torrentiels, est claire : comment peut-on prédire les apports sédimentaires très destructeurs, voire meurtriers, des crues torrentielles? Pour répondre à cette question, et organiser nos recherches, une importante analyse bibliographique a été nécessaire. Elle concerne tout d'abord un recueil de la connaissance empirique des crues torrentielles à travers des catastrophes mémorables, des observations d'événements, et des hypothèses conceptuelles du fonctionnement de la dynamique torrentielle. Les outils disponibles en ingénierie torrentielle ont ensuite été recensés et analysés, pour proposer une nouvelle voie de recherche menant à une méthode ou à un modèle simple de prédiction des volumes sédimentaires transportés par une crue torrentielle. Sur la base de concepts géomorphologiques appliqués au fonctionnement sédimentaire au sein du système torrentiel et d'outils topométriques, cette méthode a été élaborée sur le torrent du Manival (Isère, Alpes du Nord).

1. Le torrent : des connaissances empiriques

1.1. Problème du risque torrentiel pour les sociétés

1.1.1. L'évolution sociale face aux risques naturels

La manière dont les sociétés perçoivent le risque évolue au cours du temps ; ainsi Theys et Fabiani [1988] montrent que la société européenne est passée de la notion de risque comme fatalité divine à celle d'un risque maîtrisé qui a comme corollaire le droit à la sécurité. Diverses contributions d'historiens, sociologues, économistes, mettent en relief le XVIIIe siècle en tant que siècle charnière concernant la perception des catastrophes qui deviennent des accidents naturels plus prévisibles grâce à la connaissance des processus naturels [Allard, 2000].

Pour expliquer le sens de l'expression "risque naturel", la distinction est couramment faite entre deux notions : aléa et vulnérabilité [D'Ercole, 1994 ; Manche, 2000 ; Pigeon, 1998]. L'aléa représente le phénomène naturel généralement au moyen de sa fréquence et de ses descripteurs physiques, alors que la vulnérabilité exprime le degré d'atteinte de l'aléa vis à vis des enjeux, c'est-à-dire les personnes, biens, activités, réseaux, patrimoine, etc. qui peuvent être affectés par le phénomène naturel [MATE, 1997]. Le risque résulte donc de la conjonction d'au moins une vulnérabilité et d'un aléa. Dans le cas d'une crue, par exemple, l'inondation d'une zone marécageuse inhabitée ne présentera aucun risque alors qu'en zone urbaine le risque sera réel et dépendra du degré de protection contre les inondations dont elle aura été dotée. La gestion du risque passe donc par la protection contre les aléas naturels et/ou par la maîtrise de la vulnérabilité.

Dans une logique de développement durable qui cherche à concilier le progrès économique et social et la préservation de l'environnement pour les transmettre aux générations futures, des propositions récentes tentent de modifier les pratiques d'utilisation du sol et de réduire les enjeux (mesures non-structurelles). Pourtant la prévention actuellement privilégiée par la société semble être fondée sur des mesures

de protection contre les facteurs naturels (mesures structurelles), qui nécessitent la connaissance du fonctionnement de l'aléa naturel. Cette connaissance peut être empirique et s'appuyer sur l'histoire de ses manifestations quand cela est possible, ou être fondée sur des connaissances scientifiques lorsque l'on arrive à comprendre et à modéliser le fonctionnement des processus naturels. C'est là une des missions confiée aux scientifiques par la société.

1.1.2. L'évolution de la prise en compte du risque torrentiel

En zones de montagne telle que les Alpes du nord, les catastrophes naturelles et les dégâts qu'elles engendrent inquiètent les populations depuis fort longtemps. Il est vrai que l'évolution de l'activité socio-économique, particulièrement depuis la révolution industrielle du XIX^{e} siècle, ainsi que l'évolution de l'occupation du sol, notamment l'urbanisation de cônes de déjections en fond de vallée, ont rendu la gestion des risques de plus en plus préoccupante pour la société.

Certes des villes comme Chambéry et Grenoble, dans les Alpes françaises, se sont préoccupées de la gestion des risques dès le Moyen-Age en se protégeant contre les inondations [Coeur, 2001 ; Favier et Granet-Abisset, 2001], mais il faut attendre le XVIII^{e} siècle et la remise en question de la "colère divine" par les penseurs et les scientifiques de l'époque pour voir poindre l'idée de compréhension des phénomènes catastrophiques. A cette époque, la population repoussait également la fatalité et se protégeait des torrents en évitant les zones réputées dangereuses par transmission orale de génération en génération.

Au niveau législatif, les tentatives de gestion de l'Etat se sont heurtées d'une part à la perte du contrôle de la politique forestière du fait d'une loi post-révolutionnaire de 1791 qui octroyait aux citoyens la libre disposition de leurs bois, et d'autre part, à un système agropastoral qui, lié à la croissance démographique du XVIII^{e} siècle, exerçait une pression importante sur la couverture végétale en montagne.

Tableau 1-1
Quelques cas de catastrophes torrentielles

Lieu	Date	Victimes et dégâts matériels	Références bibliographiques
L'Armancette des Contamines (Hte-Savoie, France)	2005	Destruction de pont et route Dépôts estimés à 200 000 m^3	
Bab-El-Oued - Alger (Algérie)	2001	Milliers de victimes	
Vargas (Venezuela)	1999	Milliers de victimes	[Larsen, 2002]
Sarno (Italie)	1998	Victimes	[Zanchetta *et al.*, 2004 ; Guadagno *et al.*, 2005]
Arbonne de Bourg-St-Maurice (Savoie-France)	1996	Bâtiments et voie ferrée Dépôts estimés à 300 000 m^3	[Laugier et Cojean, 2001] [Koulinski, 2002]
Biescas (Pyrénées espagnoles)	1996	Dégâts et victimes dans un camping	[White *et al.*, 1997 ; Batalla *et al.*, 1999]
Torrent de Faucon (Barcelonnette, Alpes-de-Hautes-Provence)	1996	Autoroute et habitations	[Remaître *et al.*, 2002]
Hummingbird Creek (Colombie Britannique – Canada)	1997	Destruction de routes	[British Colombia, 1997]
Rivière Schmidlaine (Allemagne)	1990	Dégâts divers	[De Jong, 1992 ; Batalla *et al.*, 1999]
Laves torrentielles généralisés en Suisse	1987	Dégâts divers	[Haeberli *et al.*, 1990 ; Rickenmann et Zimmermann, 1993]
Guercia d'Isola (Alpes-Maritimes)	1957	Partie de village	[Besson, 1996]
Vaudaine (Vallée de la Romanche – Isère)	XII^{e} s.	Victimes d'inondation à Grenoble	[Besson, 1996]

Au XIX^{e} siècle, la surpopulation et la déforestation ont déstabilisé le système agropastoral qui façonnait l'espace montagnard. Suite aux inondations catastrophiques du Rhône et de la Garonne en 1856 et 1859, des lois importantes pour la gestion des risques torrentiels virent le jour. Tout d'abord en 1860, une loi sur le reboisement des montagnes avait pour but "la sécurité des grandes vallées d'aval" et pour moyen "le reboisement de la plus grande surface possible de montagne afin de régulariser le régime des eaux". Cette loi fut assouplie en 1864 par un nouveau texte avançant l'idée qu'un pâturage bien géré est aussi utile qu'une forêt pour réduire l'érosion. Enfin la loi de 1882 fixait les périmètres domaniaux de restauration des terrains en montagne aux surfaces où "le danger est né et actuel" [Besson, 1996].

Ainsi le service de la Restauration des Terrains de Montagne (RTM), service spécialisé de l'administration des Eaux et Forêt a aménagé, par des travaux de reboisement (génie biologique) et de correction torrentielle (génie civil), plus de 1000 torrents en France, principalement dans les Alpes. C'est ce qui explique que les ingénieurs forestiers, mais aussi des ponts et chaussées se soient intéressés les premiers aux processus torrentiels à travers leurs expériences : A. Surell [1841], Demontzey qui publia un ouvrage reprenant l'expérience sur la lutte contre les torrents [Demontzey, 1894], alors que P. Mougin recensait les problèmes de torrentialité de l'ensemble des Alpes du nord [Mougin, 1914].

Les publications de géographes ne sont apparues en France qu'à la fin des années mille neuf cent cinquante avec J. Tricart qui étudia des événements catastrophiques de type torrentiel [Tricart, 1957 ; Tricart, 1960]. Par la suite de nombreux auteurs décrivirent des crues de cette nature, mais en analysant rarement les processus torrentiels [Ancherri, 1966 ; Antoine, 1988 ; Boussarsar, 1987 ; Colas, 1987 ; Huchon, 1981].

Dans les années 1980, le Cemagref a pris une place primordiale dans la recherche française sur les torrents avec des approches fondées sur les lois de l'hydraulique et de la rhéologie pour quantifier et modéliser les écoulements torrentiels [Meunier, 1988]. Plus récentes, les études relevant de la géomorphologie fluviale et torrentielle s'avèrent être fortement complémentaires des approches précédentes. Elles ont généralement une vision systémique qui s'attache à quantifier et comprendre les processus torrentiels dans leur globalité [Thouret *et al.*, 1995], et sont souvent mieux adaptées aux attentes des praticiens. En revanche, les collaborations pluridisciplinaires entre géographes et hydrauliciens, bien que prometteuses, restent encore trop rares.

1.1.3. L'ampleur des dépôts sédimentaires lors des catastrophes torrentielles

Malgré les connaissances empiriques importantes et les modestes avancés scientifiques, nous sommes loin de comprendre et de maîtriser parfaitement les phénomènes torrentiels. L'actualité nous le rappelle régulièrement en se faisant écho de catastrophes torrentielles en France ou à l'étranger (**Cf. Tab. 1-1**). Dans de nombreuses régions de montagnes dans le monde, qu'elles soient fortement habitées ou non, l'aléa torrentiel reste omniprésent.

Le **tableau 1-2**, avec d'autres exemples d'événements torrentiels montrent que ces derniers peuvent déposer des volumes impressionnants de matériaux. Cette matière solide en mouvement a un très fort pouvoir de destruction qui engendre d'importants dégâts matériels mais qui est surtout à l'origine de nombreuses pertes en vies humaines.

Les volumes les plus importants (**Cf. Tab. 1-2**) concernent les lahars, écoulements torrentiels particuliers à base de matériaux volcaniques sur lesquels nous reviendrons. La liste des exemples n'est pas exhaustive et les lahars ayant eu lieu autour des volcans du Nevado del Ruiz [Lowe *et al*., 1986 ; Pierson *et al*., 1990] ou du Pinatubo [Janda *et al*., 1997] par exemple, ont déposé des volumes de sédiments bien supérieurs à 500 millions de mètres cubes.

La connaissance des volumes de sédiments susceptibles d'être mis en mouvement par les crues torrentielles serait une avancée considérable pour tous les praticiens en charge de la gestion et de la prévention des risques torrentiels. En effet, à partir de cette donnée il est possible d'imaginer et de mettre en place tout un panel de protections : zonages cartographiques de protection prenant en compte l'épaisseur et la limite d'étalement des volumes qui peuvent se déposer, mise en place de dispositifs d'alerte dans les zones menacées, calibrage du volume de stockage au sein des plages de dépôt, dimensionnement des ouvrages de protection torrentielle, etc. Actuellement les praticiens s'en remettent à leur connaissance empirique, mais il n'existe pas de méthode fiable de prédiction des

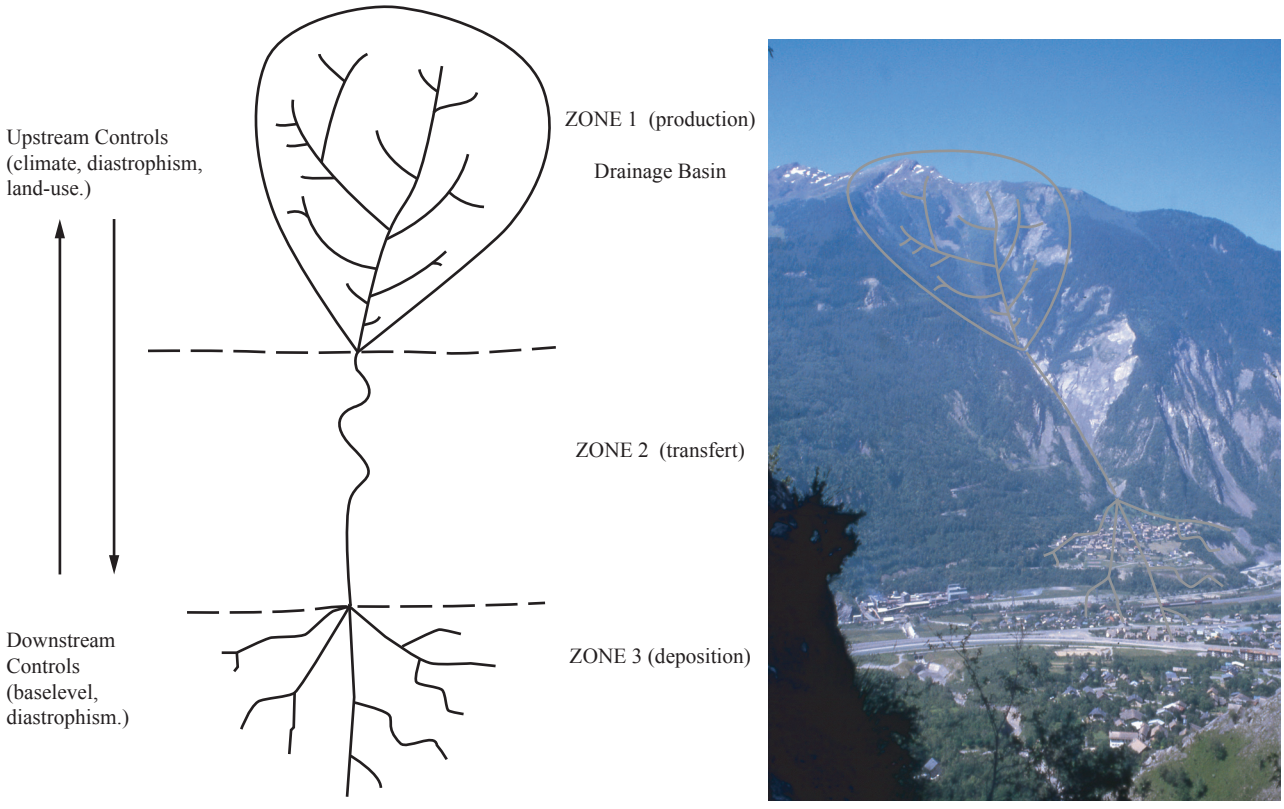


Figure 1-1
"Idealized fluvial system" (d'après Schumm, 1977, p.3) et exemple d'un bassin versant torrentiel de Maurienne (Savoie, France) (cliché S.V-C.)

Tableau 1-2
Volumes mobilisés par les "coulées de débris" (en un seul événement) d'après divers auteurs (in Sauret, 1987)

Lieu	Volumes (m^3)	Références bibliographiques
Ten Mile Rouge (Colorado)	17.10^3	(Curry, 1966)
Débâcle du Charmaix à Modane (France)	18.10^3	(Girardin, 1906)
Port Alice (Colombie Britannique)	22.10^3	(Nasmith and Mercer, 1979)
Punta Ferriate (Corse)	22.10^3	(Loye-Pilot, 1984)
Moyenne Ouest (Canada)	5.10^4	(VanDine, 1985)
Spiral Tunnels (Colombie Britannique) [1]	$1,75.10^5$	(Jackson Jr, 1979)
Reshun (Hindu Kush, Pakistan)	10^5	(Wasson, 1978)
Mont Thomas (Nouvelle Zélande) [2]	2.10^5	(Pierson, 1980)
Slide Mountain (Nevada) [3]	2.10^5	(Watters, 1983)
Ravoire de Bourg-St-Maurice (France)	3.10^5	(Périnet, 1982)
Catastrophe de St-Gervais (France) [1]	8.10^5	(Lliboutry, 1964)
Compilation générale	5.10^3-$4,75.10^5$	(Scheidegger, 1975)
Torrent Dachao (Chine)	3.10^5-5.10^5	(Jian and Defu, 1980)
Wrightwood (Californie)	$1,2.10^6$	(Sharp and Nobles, 1953)
Ravoire de Pontamafrey (France)	3.10^6	(Azimi and Devarreux, 1974)
Seti Khola (Pokhara, Népal) [4]	$5,5.10^6$	(Carson, 1985)
Japon [2]	$9,6.10^6$	(Fisher and Schmincke, 1984)
Szechuan (Tibet)	19.10^6	(Institute of Highway, 1978)
Osceola, Mont Rainier (Washington) [2]	500.10^6	(Crandell and Waldron, 1956)

[1] Rupture d'une poche d'eau sous-glaciaire ; [2] Lahar ; [3] Vidange brutale d'un lac suite à un glissement de terrain ; [4] Rupture d'un lac glaciaire

volumes sédimentaires maximum que peut fournir un bassin versant torrentiel, comme nous allons le voir au cours de cette première partie.

1.2. Spécificité des systèmes torrentiels au sein du système fluvial

1.2.1. Le bassin versant torrentiel

Le concept géomorphologique de base régissant l'approche systémique des cours d'eau est celui de *système fluvial*, qui formalise les interrelations entre le cours d'eau et son bassin versant [Schumm, 1977]. Le système fluvial propose longitudinalement de l'amont vers l'aval trois secteurs : 1) la zone de production, constituée par l'ensemble des versants et des têtes de bassin qui ont pour fonction principale de produire les sédiments qui seront progressivement évacués hors du système fluvial ; 2) la zone de transfert dont la fonction est d'assurer le transport des sédiments vers l'aval ; 3) la zone de stockage où dominent les formes d'accumulations sédimentaires. La **figure 1-1** présente ce système fluvial idéalisé où coexistent dans toutes les zones, des processus d'érosion, de transport et de dépôt mais où l'un de ces types de processus est prédominant. Cette distinction est d'autant plus difficile à faire que le bassin fluvial est de grande taille. A l'inverse, la taille réduite du bassin versant torrentiel situé en tête de bassin en fait une sorte de laboratoire naturel pour l'étude de l'érosion fluviale [Derruau, 1988] et permet généralement de décrire trois zones bien distinctes de l'amont vers l'aval (**Cf. Fig. 1-1**) :

- le bassin de réception, siège de différents processus géomorphologiques, régis par la gravité et les apports en eau, fournissant les matériaux au chenal ;
- le chenal d'écoulement, où les processus de transport prédominent ;
- le cône de déjection, zone de dépôt des matériaux fournis par le bassin versant torrentiel. Même s'il matérialise la zone à risque où la crue s'étale, il présente un intérêt moindre pour notre étude qui

s'intéresse plus à la capacité de transport des matériaux (volume de la crue) qu'à leur dépôt au cours du temps.

Situé dans la partie amont du bassin torrentiel, le bassin de réception est la zone de départ des matériaux qui transitent sur des pentes fortes et par des ravins élémentaires. C'est aussi la zone où se concentrent les eaux, bien souvent de façon intermittente. Cette concentration des eaux et des matériaux se poursuit dans le chenal d'écoulement, dont la longueur est très variable, jusqu'à plusieurs kilomètres. Dans cette zone la pente est encore forte, jusqu'à plus de 12°. Dans la partie aval, alors que la pente diminue, le torrent forme un cône de déjection dont la forme caractéristique en "éventail" est due à l'étalement et au dépôt successif des matériaux du torrent jusque dans la vallée principale. L'importance du cône dépend de la quantité de matériaux transportés par le torrent, suivant différents modes de transport (charriage ou lave torrentielle) dont le dépôt forme un édifice hétérogène.

Ainsi, bien que le torrent appartienne dans son ensemble à la zone de production sédimentaire lorsqu'il est perçu à l'échelle d'un vaste système de drainage, il s'agit d'un système fluvial à part entière lorsque l'on veut étudier son organisation interne.

1.2.2. Le torrent

Le cours d'eau de montagne constitue un organisme hydrologique spécifique, ce qui justifie l'emploi d'une terminologie propre. Le terme de "torrent", utilisé en France mais également en Italie et en Espagne (*torrente*), est dérivé du latin *torrens* signifiant "dévorant, impétueux". L'usage de ce terme se serait développé à partir du XV^{e} siècle au cours d'une période marquée par une recrudescence de la torrentialité dans les Alpes. Le torrent symbolise alors une nature dangereuse, sauvage et indomptable [Liébaut, 2003]. Cette idée se retrouve dans le terme germanique *wildbach* qui signifie ruisseau sauvage. Dans la littérature scientifique anglo-saxonne *torrent* est très peu employé car il s'utilise plus comme un qualificatif (un cône torrentiel, une pluie torrentielle,…), et on trouvera généralement le terme plus large de rivière de montagne (*mountain stream*) ou parfois une correspondance plus proche, *creek* provenant des Etats-Unis.

En France, le torrent a été défini sur la base des connaissances empiriques acquises par les forestiers ayant eu en charge la gestion des risques torrentiels, à partir de 1860. Dès la fin du XIX^{ème} siècle, Demontzey [1894] subdivisait les cours d'eau des montagnes en cinq classes :

- Les rivières, qui coulent dans les vallées larges, ont un assez fort volume d'eau, des crues prolongées et divaguent sur un lit large et assez plat dont elles n'occupent qu'une petite portion ;
- Les rivières torrentielles, affluents principaux des rivières – à vallées plus resserrées et moins longues – à pentes plus rapides et à volume d'eau moins considérable ;
- Les torrents, "tributaires" des rivières torrentielles, à vallées courtes – à crues subites, à pentes très fortes – à cours parfois intermittent, ayant pour caractère l'affouillement dans la montagne, le charriage des matériaux arrachés, leur dépôt dans la vallée et la divagation sur ces dépôts ;

- Les ruisseaux, à petits volumes d'eau mais non intermittent – à lit solide – n'affouillant pas, ne charriant pas – et fournissant la plupart des cascades ;
- Les ravins, "tributaires" du torrent mais fonctionnant comme lui.

Un peu plus tôt, Surell [1841] donnait une définition assez précise du torrent en précisant un seuil de pente généralement supérieur à 6% (**Cf. Tab. 1-3**). Derruau [1988] mentionne dans son précis de géomorphologie que les torrents "sont des cours d'eau à régime spasmodique, à forte pente et qui travaillent dans des matériaux faciles à affouiller". Comme les précédents auteurs, il accorde à la pente un rôle majeur. De plus il indique très clairement que les torrents profitent de conditions fortement favorables à la production de matériaux et au transport solide. Ces derniers sont actifs lors de spasmes, à l'occasion de crues brutales, qui sont les temps forts de la morphogenèse avec une très grande capacité d'érosion et de transport de matériaux [Ballandras, 1997; Peiry, 1988].

Tableau 1-3
Quelques exemples de définition du torrent (in Liébaut, 2003)

Références	Définitions
Surell, 1841	Les torrents coulent dans des vallées très courtes, qui morcellent les montagnes en contre-forts ; quelquefois même, dans de simples dépressions. Leurs crues sont courtes, et presque toujours subites. Leur pente excède six centimètres par mètre, sur la plus grande longueur de leur cours : elle varie très vite, et ne s'abaisse pas au dessous de deux centimètres par mètre. Ils affouillent dans la montagne ; ils déposent dans la vallée ; et ils divaguent ensuite, par suite de ces dépôts.
FAO, 1981	Petits cours d'eau de montagne, temporaires ou permanents, à forte pente, à crues violentes et subites, au débit solide et liquide très variable, réalisant en général des charriages importants.
Peiry, 1990	Le système torrentiel est constitué de l'ensemble des surfaces concentrant progressivement les flux d'eau et de débris en direction d'un talweg qui assure leur écoulement vers l'aval et leur épandage sur un cône de déjections. Le bassin versant torrentiel se caractérise par la vigueur des pentes sur les versants, la raideur du profil en long et la présence de trois zones bien individualisées : le bassin de réception, le chenal d'écoulement et le cône de déjections.
Neboit, 1991	Organisme hydrologique spécifiquement montagnard qui fonctionne par intermittence. L'essence de la torrentialité, c'est le retour, à intervalles réguliers, de crues soudaines et brutales, dont l'abondance et la violence contrastent avec la médiocrité des écoulements habituels. Le propre d'un torrent est de se manifester par à-coup brefs, sans périodicité fixe, au gré des averses exceptionnelles. Ces aspects hydrologiques combinés à la vigueur des pentes génèrent des écoulements d'une turbulence extrême, capable de mettre en mouvement des quantités énormes de matériaux.
Circulaire du 9 mai 1995[1]	Cours d'eau à forte pente qui se caractérise par un débit irrégulier dépendant des précipitations et des fontes de neige, les étiages dus au froid hivernal ou à la sécheresse estivale pouvant alterner avec des crues soudaines.

[1] Circulaire relative aux extractions de matériaux dans le lit mineur des cours d'eau de montagne

L'école française d'hydraulique torrentielle distingue généralement le torrent de la rivière torrentielle selon des critères de pente et de concentration volumique du transport solide [Besson, 1996]. La définition hydraulique du torrent est également fondée sur un seuil de pente supérieur à 6% mais aussi sur l'occurrence de laves torrentielles, définies comme des écoulements à forte concentration solide pouvant atteindre 80% du mélange eau-sédiments (**Cf. Fig. 1-2**). La rivière torrentielle présente une pente comprise entre 1 et 6% et un transport solide à concentration sédimentaire plus modérée. La **figure 1-2** montre qu'il n'y a que dans les torrents que l'on puisse observer tout le panel des types de transports solides, développé maintenant plus en détail dans le paragraphe suivant.

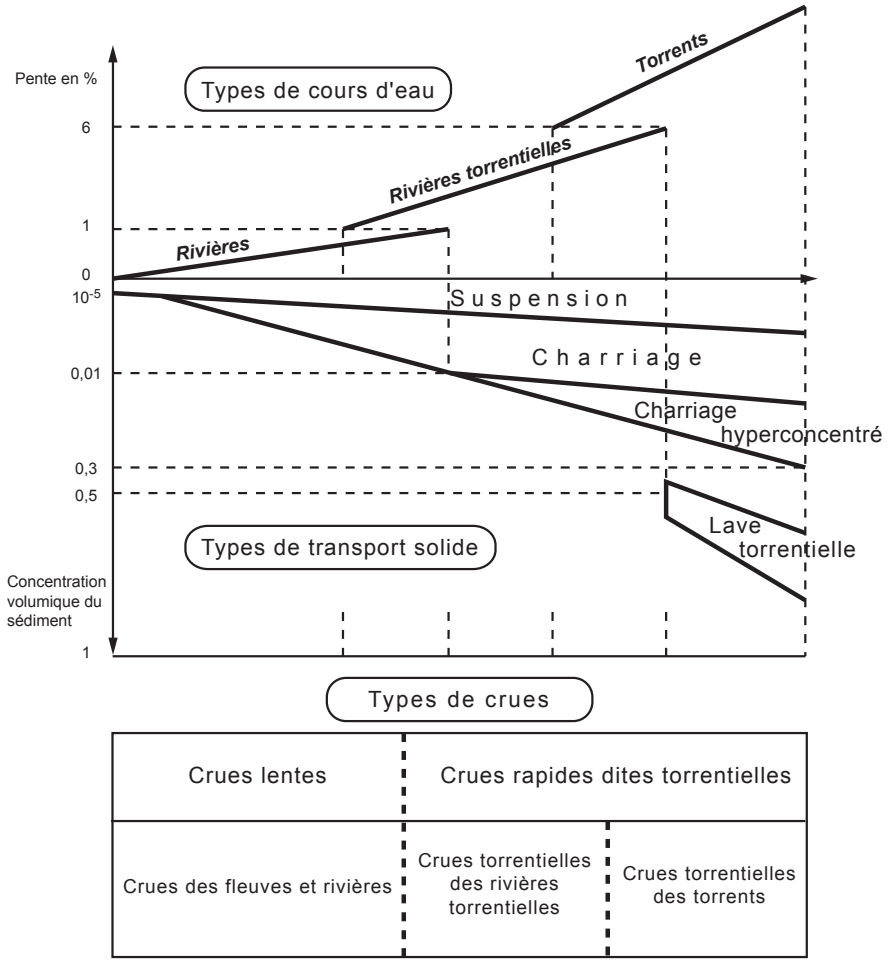


Figure 1-2
Classification des différents types de cours d'eau selon des critères hydrauliques et sédimentaires (d'après Besson, 1995, p.78)

1.3. Spécificité du torrent vis à vis des transports solides

1.3.1. Les différents types de charriage : des écoulements biphasiques

Comme dans les rivières, les modes de transport classiques dans les écoulements fluviatiles que sont la suspension, la saltation ou le charriage, se retrouvent dans les torrents (**Cf. Fig. 1-2**), mais ces types de transports ne sont pas très efficaces en terme de morphogénèse en comparaison des charriages hyperconcentrés ou des laves torrentielles et ne surviennent que lors d'écoulements relativement faibles. Dans une logique de gestion du risque torrentiel, nous nous sommes intéressés aux plus importants volumes transportés, c'est donc pour cette raison que nous nous contenterons de mentionner ces modes de transports solides fluviatiles, par ailleurs bien décrits [Amoros et Petts, 1993 ; Bravard et Petit, 1997 ; Veyrat-Charvillon, 1998].

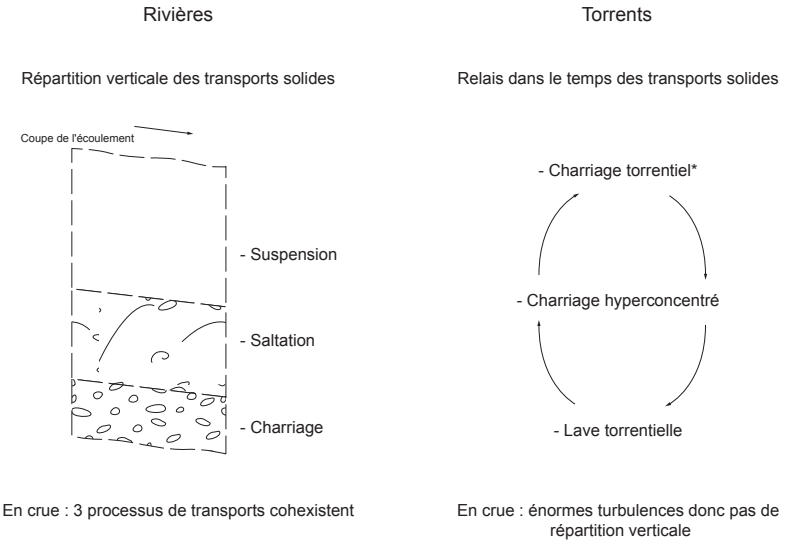


Figure 1-3
Distinction entre les processus de transports solides des rivières et ceux des torrents (le processus de charriage des torrents regroupe la suspension, la saltation et le charriage des rivières)*

A. Distinction des transports solides dans les rivières et dans les torrents

En revanche, la similitude des termes "charriage" et "charriage hyperconcentré", nécessite une distinction claire entre le vocabulaire utilisé pour les transports solides des cours d'eau fluviaux et celui utilisé pour les transports solides torrentiels (**Cf. Fig. 1-3**).

Dans les rivières, lors d'une crue, trois modes de transports coexistent et se répartissent verticalement dans l'écoulement. Cette répartition dépend d'un rapport de forces lié d'une part au poids des particules, et d'autre part à la turbulence de l'écoulement. Ainsi les particules les plus fines seront généralement plus près de la surface alors que les plus lourdes se retrouveront au fond. Les trois types de transports solides correspondants sont :

- la suspension, où les sédiments les plus fins sont maintenus au sein de l'écoulement par la turbulence de l'eau,
- la saltation, stade intermédiaire entre la suspension et le charriage où les particules évoluent dans l'écoulement par bonds successifs,
- le charriage, où les matériaux les plus grossiers sont entraînés au fond de l'écoulement par des mouvements plus ou moins complexes (glissement, roulage,…).

Au cours d'une crue dans un torrent, l'énorme turbulence qui règne dans l'écoulement ne permet pas la mise en place d'une répartition verticale des particules selon le mode de transport. Par contre, on observe un relais dans le temps de trois processus distincts, caractérisés par leur concentration en matière solide :

- le charriage torrentiel, qui regroupe les trois processus de transport solide des rivières,
- le charriage hyperconcentré,
- la lave torrentielle.

B. Particularités du charriage torrentiel

Comme le charriage classique (fluviatile ou torrentiel), le charriage hyperconcentré est un écoulement biphasique avec, pour simplifier, un écoulement liquide ayant une énergie suffisante pour mettre en mouvement un volume de sédiments schématisé par une superposition de deux couches distinctes (l'eau d'une part et les sédiments d'autre part). Il s'en distingue cependant par une turbulence extrême et une concentration volumique en sédiments de toute granulométrie supérieure à 5%, avec une plus faible stratification des particules. Lorsque la concentration en sédiments est plus faible, généralement en fin de crue et sur des pentes inférieures à 1%, le charriage hyperconcentré laisse place à du charriage torrentiel où une certaine stratification verticale réapparaît nettement [Meunier et Bertran, 2001]. Le transport par charriage hyperconcentré est un phénomène intermédiaire ayant des caractéristiques communes à la fois avec le charriage torrentiel et avec la lave torrentielle. Ainsi Takahashi [1987], a proposé le terme de lave torrentielle immature (*immature debris flow*).

Nous avons volontairement négligé le terme "suspension hyperconcentrée", utilisé lorsque l'effet des matériaux en suspension devient prépondérant dans le comportement du fluide. C'est le cas de cours d'eau des terres noires des Alpes du Sud ou de certains fleuves chinois, mais la plupart de temps la forte turbulence fait que la suspension hyperconcentrée est combinée au charriage hyperconcentré qui met en jeu des quantités de matériaux bien supérieures. Cette combinaison est d'autant plus probable qu'une forte charge en suspension a tendance à faciliter le transport d'éléments plus grossiers [Rickenmann, 1989] ; lorsque la concentration sédimentaire de la suspension hyperconcentrée augmente, elle peut même être considérée comme une lave torrentielle [Borges, 1993]. Ainsi nous parlerons indifféremment de charriage hyperconcentré ou d'écoulement hyperconcentré.

1.3.2. Les laves torrentielles : des écoulements monophasiques

Bien que le charriage hyperconcentré puisse transporter de grandes quantités de matériaux, la lave torrentielle est généralement le processus de transport solide le plus efficace et le plus destructeur [Benda, 1990 ; Wohl et Pearthree, 1991], particulièrement dans les Alpes françaises. C'est pourquoi notre travail, dans une logique d'application aux risques torrentiels, a été dans un premier temps, plus spécifiquement appliqué aux laves torrentielles.

Tableau 1-4
Correspondances entre termes étrangers et termes français (d'après Flageollet, 1989)

Français	Anglo-saxon	Italien	Hispanique
Eboulement (catastrophique)	Rock fall avalanche	Smottamento	Irrupcion
	Flowslide		
	Rock fall		
	Debris flow		
Coulées de débris	Debris flow	Colata di detrito	Flujo
de boue	Mud flow		
de blocs	Rockflow	di blochi	Flujo de arcilla
de terre	Earthflow	di terra	Corriente di terra
Avalanche de débris	Debris avalanche	Valanga di detrito	Avalanchia de derrubios
Lave torrentielle	Debris flow		Torrente de detritus

A. Terminologie des laves torrentielles

Dès la fin du XIX^{ème} siècle, Lechalas [1884] utilisa le terme de "lave" associé à l'adjectif "boueux" pour définir une lave torrentielle. Cela préfigure des problèmes de terminologie rencontrés par la suite pour décrire ce phénomène. Comme pour le torrent il existe bien sûr une quantité de termes vernaculaires plus ou moins anciens, liés aux dialectes des différentes vallées montagnardes [Blijenberg, 1998 ; Innes, 1983]. Depuis, en France, la confusion règne entre les différents termes suivants : "lave torrentielle", "coulée de boue", "avalanche de débris", "coulée de débris" [Le Méhauté, 2000]. Dans le grand public aujourd'hui, et particulièrement dans les médias, on parle généralement de "coulée de boue", alors que dans le domaine spécialisé, ce terme a plutôt été associé au déclenchement d'une coulée sur un versant sans préexistence d'un talweg prononcé. Cette distinction se retrouve dans toutes les langues de l'arc alpin [Bardou, 2002].

Dans les autres langues, les problèmes de terminologie semblent être les mêmes, voire plus prononcés pour les termes anglo-saxons, qui sont incontournables pour la communauté internationale (**Cf. Tab. 1-4 et Tab. 1-5**). Le terme anglo-saxon correspondant, le plus adéquat, semble être *debris flow* [Blijenberg,

Tableau 1-5
Correspondance étrangère du terme lave torrentielle (d'après Bardou, 2002)

Allemand		
nom	Mur~	~gang
la traduction	la boue	notion de mouvement (aller)
le concept	le matériau	le mouvement
nom	Hang~	~mur
la traduction	dans la pente	la boue
le concept	l'état précédent le mouvement	le matériau

Italien		
nom	lave	torrentizie (Agostoni 1997)
la traduction	la lave	torrentielle
le concept	le type de mouvement	le lieu
nom	colata	detritica (ou di fango)
la traduction	la coulée	de débris (ou de boue)
le concept	le mouvement	le matériau

Anglais		
nom	debris	flow
la traduction	les débris	s'écouler
le concept	le matériau	le type de mouvement

Japonais			
nom	dose~	~ki~	~ryu
la traduction	les débris	les sédiments	l'écoulement
le concept	le matériau	la matrice	le type de mouvement

Russe (Asie centrale)		
nom	sjel	structuré
le concept		éclt. laminaire et monophasique
nom	sjel	turbulent
le concept		éclt. turbulent et biphasique

Indonésien	
nom	lahar
le concept	écoulement de matériau (cendres, scorie) sur les pentes d'un volcan

1998 ; Nasmith et Mercer, 1979 ; Takahashi, 1981 ; Varnes, 1978]. *Debris flow* se réfère également à une large gamme de processus comprenant des mouvements de masse sur des versants plans, et pas seulement des écoulements de lave dans un chenal torrentiel. De nombreux auteurs, conscients de ce problème, ont recours à une terminologie différente mais malheureusement pas forcément plus claire : *alpine mudflows* [Broscoe et Thomson, 1969 ; Winder, 1965], *valley-confined flows* [Brunsden, 1979 ; Innes, 1983], *mountain debris flows* [Zaruba et Mencl, 1976] ou encore *channelized debris flows* [Evans, 1982 ; VanDine, 2000]. Les termes pouvant se traduire littéralement par "coulées de débris canalisées" tel qu'on peut lire chez Sauret [1987] correspondent généralement à ce que les auteurs français nomment "laves torrentielles".

Le terme *lahar* d'origine indonésienne peut-être assimilé à une lave torrentielle particulière : bien que comparable aux autres types de laves torrentielles, avec des formes similaires et un déclenchement sur des pentes fortes, elle s'en distingue par sa composition en matériaux volcaniques lui conférant une fluidité importante, avec des volumes de matériaux et des distances d'écoulement sur de faibles pentes (pente minimale d'arrêt de 0,1%) bien supérieurs à ceux des laves torrentielles classiques. Il existe une typologie bien fournie des différents lahars [Lavigne et Thouret, 2000]. Bien que les lahars ne nous concernent pas directement dans les Alpes, la mise en place au cours du temps de leur définition est riche d'enseignement et pourrait servir d'exemple pour élaborer une définition commune des laves torrentielles au niveau international. Dès le début du XX^{e} siècle, des études sur les dépôts des éruptions volcaniques du Katmaï (Alaska) en 1912 et du Kelud (Indonésie) en 1919 mentionnent ce terme désignant alors tout "dépôt torrentiel d'eau mélangée avec de la boue volcanique et des débris de toutes dimensions" [Escher, 1922]. Cette définition assez vague fut par la suite maintes fois critiquée, voire abandonnée par de nombreux chercheurs, qui lui reprochaient son ambiguïté et son imprécision. En particulier, le terme "lahar" qualifiait à la fois un écoulement et le dépôt issu de cet écoulement [Crandell, 1971], ce qui introduisait de fréquentes confusions. En outre, le terme ne prenait pas en considération les caractéristiques sédimentologiques et rhéologiques des écoulements. A la Penrose conference (Portland, EU) en 1989, le terme "lahar" a été clarifié : il est maintenant considéré comme "un mélange de débris et d'eau (autre qu'un écoulement fluviatile) s'écoulant d'un volcan à vitesse rapide. Un lahar est un événement (*event*) ; il peut être lié à un ou plusieurs processus comme une coulée de débris (*debris flow*) ou un écoulement hyperconcentré (*hyperconcentrated streamflow*), mais ne peut qualifier un dépôt" [Smith et Fritz, 1989 ; Smith et Lowe, 1991]. Cette distinction entre le dépôt et l'écoulement est aujourd'hui la plus fréquemment suivie [Lavigne, 1998]. Le terme de *hyperconcentrated streamflow* est parfois remplacé par *lahar runout flow* par certains auteurs de l'USGS (United States Geological Survey). Malheureusement, cela ne clarifie pas encore le terme générique de lave torrentielle (*debris flow*) puisque dans la définition du lahar, la coulée de débris (*debris flow*) se réfère uniquement à un certain type d'écoulement qui change généralement au profit de l'écoulement hyperconcentré (*hyperconcentrated streamflow*) au cours d'un même événement. Tout au long de notre travail, c'est généralement à l'ensemble de l'événement torrentiel, avec tout le panel des écoulements

spécifiques qui lui sont associés (coulée de débris, écoulement hyperconcentré, charriage), que nous ferons allusion en utilisant le terme de lave torrentielle (*debris flow*).

Quant à la place des laves torrentielles dans les processus géomorphologiques, Besson [1996] remarque très pertinemment que chacun utilise en fait la classification correspondant à sa culture scientifique, les laves torrentielles étant tantôt classées avec les mouvements de terrain au sens large comme les glissements, tantôt dans le domaine des fluides et de l'hydraulique. Meunier [1988] a tenté de faire une clarification des différents types de phénomènes, illustrée par la **figure 1-4**. Sur l'axe horizontal de cette figure, différents types de transports solides sont répartis en fonction de leur teneur en eau et de leur concentration volumique en sédiment. Les limites marquées en pointillés représentent le passage fréquent d'un mode de transport à l'autre, ces limites n'étant pas toujours très nettes dans la réalité. On constate effectivement que le transport des sédiments par lave torrentielle se situe à l'interface entre les mouvements de terrain d'une part, et les écoulements fluides d'autre part.

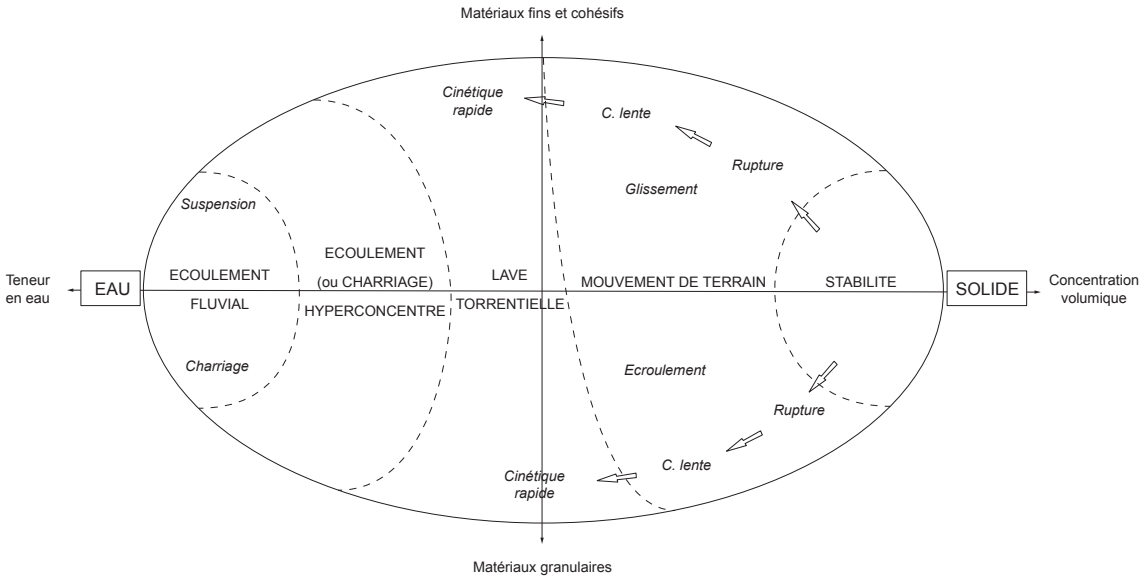


Figure 1-4
Schématisation des phénomènes torrentiels (d'après Meunier, 1991, modif.)

B. Définition des laves torrentielles

Les descriptions par différents auteurs sont parfois lyriques mais très réalistes et complètes, comme si l'événement avait été filmé (**Cf. Tab. 1-6 et Fig. 1-5**). Elles illustrent parfaitement ce que sont les laves torrentielles. On les définit généralement comme un mouvement de masse chargé d'eau, d'argile et de matériaux minéraux et organiques grossiers, descendant rapidement la pente d'un versant ou confinée dans un chenal préexistant [Besson, 1996 ; Coussot, 1996 ; Hungr *et al*., 1984 ; Van Dine, 1985].

La forte pente des torrents est une condition nécessaire mais non suffisante pour ce type de transport. Une des caractéristiques principales des écoulements de lave torrentielle, en particulier dans les Alpes du Nord, est la concentration en argile qui doit être suffisante pour former une matrice. Globalement, il

Tableau 1-6
Description d'événements de laves torrentielles (in Sauret, 1987)

« Ce n'est pas de l'eau pure, mais une espèce de boue liquide, mêlée d'ardoise décomposée et de fragments de rochers ; la force impulsive de cette bouillie dense et visqueuse est incompréhensible ; elle entraîne des rochers, renverse les édifices qui se trouvent sur son passage, déracine les plus grands arbres et désole les campagnes, creusant de profondes ravines, et couvrant les terres d'une épaisseur considérable de limon, de gravier et de fragments de rochers. Lorsque les gens du pays voient venir ce torrent qu'ils nomment le « Nant Sauvage », ils poussent de grands cris pour avertir ceux qui sont au-dessous de fuir loin de son passage […]. On ne peut pas imaginer un spectacle plus hideux : ces ardoises décomposées formaient une boue épaisse, dont les vagues noires rendaient un son sourd et lugubre, et malgré la lenteur avec laquelle elles semblaient se mouvoir, on les voyait rouler des troncs d'arbres et des blocs de rochers, d'un volume et d'un poids considérables […]. »
H.-B. De Saussure (1781), cité par Eisbacher (1982)

« Ce flot de boue est doué d'une force énorme, il s'assimile à tout ce qui se trouve sur son passage, il entraîne des quartiers de rochers, déracine les arbres, détruit les berges du torrent qui s'éboulent dans le lit et dont les débris sont entraînés par la masse d'eau qui suit la lave. Enfin, arrivées à la sortie du canal d'écoulement, ces coulées de boue s'étendent sur le cône de déjection et portent au loin la dévastation, renversant les maisons, creusant de profonds ravins, détruisant les ravines et couvrant les terres d'une épaisseur souvent considérable de limons, de graviers et parfois de rochers, dont l'ensemble constitue un terrain nouveau, momentanément du moins, absolument infertile. »
Thierry (1891), cité par Gachet (1980)

« A mes pieds, le lit du torrent, profond de 8 mètres environ et large de 25 mètres, est presque à sec, malgré l'orage. Mais regardant en amont, dans la direction des chutes qui se trouvent à cet endroit, je vois une immense masse noire qui s'avance comme un mur et presque sans bruit, descendant le lit du torrent. C'était la lave qui venait de la montagne et qu'il m'était donné d'observer dans toute son intensité […]. C'est un amalgame de terre et de blocs de grosseurs, ayant à peine la fluidité du béton. En avant, à moitié prise dans cette boue très épaisse, une avant-garde de blocs cubant parfois jusqu'à 5 et 6 mètres cubes semble poussée par la lave. Ces rochers, qui sont entraînés pendant quelques minutes, sont engloutis dans le chaos qui les suit dès qu'ils trouvent un obstacle qui les arrête. Ils sont alors remplacés par d'autres, qui sont poussés et bientôt engloutis à leur tour. Toute cette masse n'est point animée d'une vitesse uniforme. Tantôt le mouvement est assez rapide, tantôt il est au contraire extrêmement lent, et à certains moments même tout semble immobile […]. Mais bientôt les matériaux franchissent l'obstacle qui les arrêtait, soit qu'ils aient passé par dessus, soit qu'ils l'aient fait céder à la pression formidable qu'il supportait. Alors la vitesse s'accélère de nouveau et toute la masse se remet en mouvement pour s'arrêter encore […]. Le profil en travers était toujours très convexe vers le ciel, quand la lave montait, et légèrement concave, quand elle diminuait […]. C'est ainsi que la lave épaisse descendit pendant vingt minutes environ. On n'entendait presque aucun bruit, seulement, de temps en temps, le son strident d'un rocher frottant contre la berge ou contre un autre rocher. Cependant cette lave devient de plus en plus liquide et dès lors animée d'une vitesse toujours croissante. Bientôt l'eau arrive en grande abondance ; elle coule comme un ruisseau furieux sur la lave qui elle-même marche encore lentement. Alors le bruit commence ; l'eau, arrivant avec une grande force, forme des lames qui atteignent jusqu'à 2 mètres de hauteur et avancent avec le courant qu'elles suivent. Elles entraînent ainsi des blocs assez gros qui souvent paraissent à la surface, s'entre choquent sans cesse et font un épouvantable fracas. Mais l'eau rejoint bientôt la lave épaisse qui est en avant et lui donne une nouvelle poussée. Enfin, quand tout est balayé par devant, l'eau devient presque claire. Elle coule alors par-dessus la lave qui restait au fond du lit, et, devenue affouillante, se creuse un passage au milieu des débris. On ne voit plus alors que quelques traces des matériaux entraînés qui sont restées adhérentes à la berge et témoignent seules de la hauteur à laquelle la lave est montée. L'eau a nettoyée le lit du torrent et les matériaux ont été entraînés plus loin […]. »
Schlumberger (1876), garde général des forêts de Barcelonnette, cité par Demontzey (1894)

faut une concentration d'argile comprise entre 15 et 55% pour engendrer des laves [Bonnet-Staub, 1998]. Le comportement interne de l'écoulement semble fortement influencé par la différence de concentration d'argile. Lorsqu'elle est suffisante, la matrice boueuse ainsi créée rend l'écoulement monophasique : l'eau et les sédiments forment un mélange intime et la lave torrentielle se présente comme un fluide épais parsemé d'éléments rocheux qui a la consistance et les propriétés mécaniques d'une pâte (déformations continues). En hydraulique torrentielle, où l'objectif est de modéliser les transports solides par des lois de comportement, une typologie distingue les laves torrentielles à dominante argileuse dont on vient de parler, des laves torrentielles à dominante granulaire ayant une concentration argileuse plus faible. Les secondes, fréquentes au Japon, sont beaucoup plus rares en France et sont considérées comme un écoulement biphasique car les deux phases, solide et liquide, sont alors plus dissociées que pour les laves torrentielles à dominante argileuse [Meunier, 1991]. Toutefois l'observation macroscopique de tous les types de laves torrentielles (lahars compris) est très similaire, et cette typologie (**Cf. Tab. 1-7**) basée sur une approche rhéologique a été remise en question. Par exemple, des expérimentations sur des lahars riches en particules argileuses n'ont pas montré de réelle cohésion interne [Major, 1997]. Iverson [2003] conteste cette approche qui associe une seule loi rhéologique à un événement torrentiel

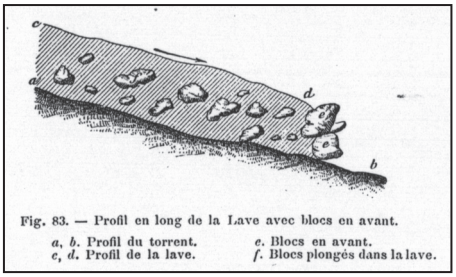


Fig. 83. — Profil en long de la Lave avec blocs en avant.
a, b. Profil du torrent. e. Blocs en avant.
c, d. Profil de la lave. f. Blocs plongés dans la lave.

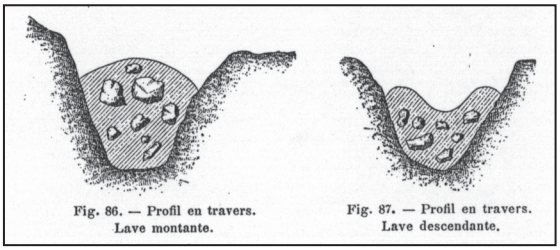


Fig. 86. — Profil en travers. Lave montante.

Fig. 87. — Profil en travers. Lave descendante.

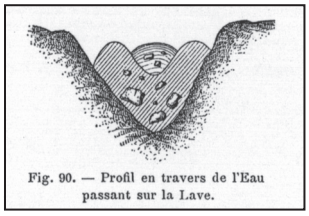


Fig. 90. — Profil en travers de l'Eau passant sur la Lave.

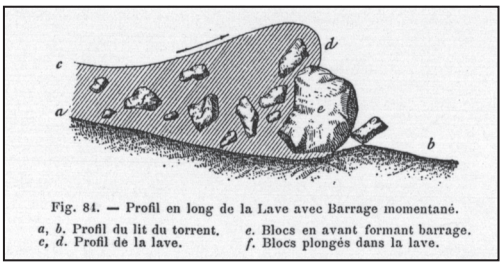


Fig. 84. — Profil en long de la Lave avec Barrage momentané.
a, b. Profil du lit du torrent. e. Blocs en avant formant barrage.
c, d. Profil de la lave. f. Blocs plongés dans la lave.

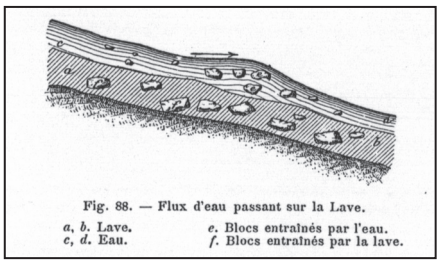


Fig. 88. — Flux d'eau passant sur la Lave.
a, b. Lave. e. Blocs entraînés par l'eau.
c, d. Eau. f. Blocs entraînés par la lave.

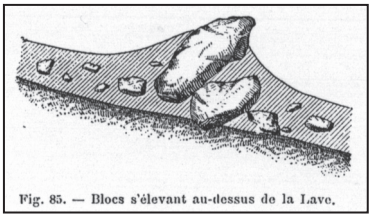


Fig. 85. — Blocs s'élevant au-dessus de la Lave.

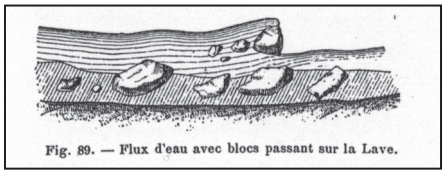


Fig. 89. — Flux d'eau avec blocs passant sur la Lave.

Figure 1-5
Croquis d'écoulements torrentiels (d'après Demontzey, 1894)

Tableau 1-7
Classification rhéologique en France des laves torrentielles (d'après Ancey, 1999)

Nom scientifique proposé		Lave torrentielle à comportement viscoplastique	Lave torrentielle à comportement frictionnel-collisionnel	Lave torrentielle à comportement frictionnel-visqueux
Nom commun		Lave torrentielle boueuse	Lave torrentielle granulaire	Lahar
Caractéristiques de terrain	Forme et nature des dépôts	Régulier, avec des limites assez bien définies, encore fluide quand saturé d'eau, très cohésif quand sec	Chaotique avec des limites pas nécessairement franches, pas de cohésion des dépôts	En forme de terrasses alluvionnaires, cohésion suffisante pour supporter le poids d'un homme
	Forme des bourrelets et des lobes	Forme arrondie	Plane	Pas de bourrelet
	Pente de la zone d'arrêt	>5 %	>15 %	>0,1 %
Caractéristiques mises en évidence en laboratoire	Rhéologie	Loi de comportement viscoplastique (Bingham, Herschel-Bulkey)	Loi de comportement de type Coulomb	Loi de comportement Coulomb aux faibles vitesses et Newton aux fortes vitesses
	Nombre de paramètres de la loi de comportement	2 ou 3 (K, n, τ_c)	2 (K, φ)	1 à 2 (φ, μ)
	Granulométrie	Matrice fine importante avec quantité importantes d'argiles	Matrice fine faible, peu d'argiles	Matrice fine importante avec peu d'argiles et beaucoup de silts
	Essais d'identification des sols	Sols argileux	Sols grossiers	Sols limoneux, le plus souvent d'origine volcanique
Témoignages	Vitesse observée (m/s)	1-30	?	1-30

car ce dernier est complexe et abrite notamment d'importantes variations temporelles et spatiales de ses conditions internes ; il propose alors une nouvelle approche (*mixture theory*) applicable à la fois aux écoulements avec fortes frictions entre les matériaux et aux écoulements beaucoup plus fluides.

C. Description d'une bouffée de lave torrentielle

Il arrive très fréquemment que les laves torrentielles s'écoulent par pulsations ou bouffées successives, espacées d'un intervalle de temps variable, allant de quelques secondes à quelques heures [Azimi et Devarreux, 1974 ; Morton et Campbell, 1874 ; Pierson, 1980 ; Pierson *et al*., 1990 ; Sharp et Nobles, 1953]. Ces pulsations peuvent avoir des origines diverses :

- météorologique, liée à des variations d'intensité de la pluie au cours de l'averse ;
- rhéologique et/ou hydraulique, liée à l'instabilité inhérente aux écoulements visqueux [Davies, 1988 ; Major, 1997 ; Phan Thien et Dudek, 1982] ;
- géomorphologique, l'écoulement étant souvent interrompu quelques minutes par un barrage temporaire [Gallino et Pierson, 1985], une rupture de pente naturelle ou anthropique (barrage ou seuil de correction torrentielle). De telles interruptions généreront autant d'ondes successives en aval ;
- composite, lorsque des arrivées d'eau non synchrones en provenance des rivières tributaires génèrent des laves torrentielles "composites", par référence aux crues composites [Arguden *et al*., 1989].

Bien entendu ces différents facteurs peuvent se combiner au cours d'un même événement [Davies *et al*., 1992].

Chaque bouffée peut être décomposée en trois zones caractéristiques qui constituent la morphologie de l'écoulement (**Cf. Fig. 1-6**)[Coussot, 1996 ; Coussot et Meunier, 1995 ; Johnson et Rodine, 1984] :

- le bourrelet frontal,
- le corps de coulée,
- la queue de coulée.

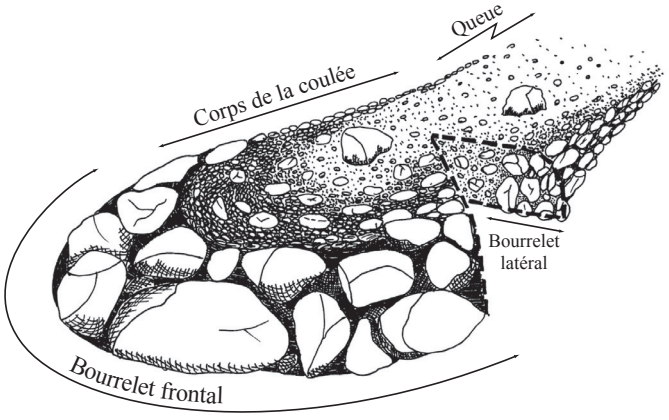


Figure 1-6
Les zones morphologiques caractéristiques des laves torrentielles (d'après Bardou, 2002). Remarquez l'emplacement des plus gros blocs situés préférentiellement sur la partie externe des bourrelets et flottant en surface dans l'écoulement

Le bourrelet frontal est très fréquemment mentionné lors des descriptions de laves torrentielles, et c'est certainement lui qui leur donne cet aspect si terrifiant. Dans la plupart des cas, ce bourrelet est constitué de gros blocs dont la taille atteint souvent plusieurs mètres cube et parfois beaucoup plus, éventuellement mêlés à des troncs d'arbres, le tout sans ou avec peu de matrice fine et constituant un véritable mur pouvant atteindre plusieurs mètres de haut, qui emporte tout sur son passage. La hauteur maximale de la lave torrentielle se situe parfois au niveau du front ou plus fréquemment juste en arrière de celui-ci. Par exemple lors de l'événement du 19 janvier 2002 dans le torrent de la Curah Lengkong (Java, Indonésie), le front, poussé par la masse de la lave, avait une hauteur de 3,5 mètres alors que l'épaisseur maximale de l'écoulement arrivant juste derrière était de 4,5 mètres (**Cf. Fig. 1-7**).

Le corps de la coulée vient ensuite : la surface visible de la lave s'abaisse et, latéralement, apparaissent des levées très caractéristiques [Tricart, 1957]. Ces bourrelets latéraux [Dolfus, 1960 ; Johnson, 1970 ; Sharp, 1942], alimentés par le front de lave, sont déposés de part et d'autre de la coulée au fur et à mesure de sa progression. De moindre ampleur que le bourrelet frontal, ils présentent cependant les mêmes caractéristiques : les éléments les plus grossiers, blocs à structure ouverte, se retrouvent sur les faces externe des levées, alors que sur les faces internes la matrice est beaucoup plus présente. La forme des levées est nettement convexe et asymétrique, leurs flancs internes étant plus raides que leurs flancs externes. Entre les bourrelets latéraux, l'écoulement transporte des blocs imposants dans un mélange plus ou moins boueux. Ces blocs peuvent être roulés ou effectuer des sauts successifs assez lents sur le fond, sur les parois du chenal ou contre d'autres blocs, mais il est fréquent de les voir rester à la surface de l'écoulement en flottant comme s'il s'agissait de simple bouchons de liège qui peuvent atteindre plus de 100 m3 [Gavrilovic et Matovic, 1991].

La queue de la lave, avec une consistance beaucoup plus fluide, est une forme de l'écoulement moins chargée en sédiment que les précédentes. On se rapproche ici des écoulements de rivières torrentielles avec du charriage hyperconcentré ; les chenaux étroits peuvent être multiples et les blocs les plus importants sont déchaussés puis roulés. Ainsi lors de l'événement du 19 janvier 2002 dans le torrent Curah Lengkong, les plus gros blocs transportés avaient un rayon identique à la hauteur de l'écoulement (atteignant encore un mètre en fin de crue).

La morphologie de l'écoulement est fortement liée à la dynamique hydraulique. En reprenant la terminologie du lahar, on retrouve la "coulée de débris" (*debris flow*) au niveau du corps de la lave torrentielle, puis l'écoulement hyperconcentré (*hyperconcentrated streamflow*) lors du passage de la queue. En fin d'écoulement, on observe un retour progressif au charriage torrentiel (écoulement fluviatile).

Figure 1-7
Passage du front du lahar du 19 janvier 2002 dans la Curah Lengkong sur les flancs du volcan Semeru (île de Java, Indonésie). Au niveau du seuil en béton où la largeur du chenal est de 33 mètres, la hauteur maximale a été de 4,5 mètres. Les lettres indiquent l'ordre chronologique de progression du lahar (clichés F.Lavigne et S.V-C.)

1.4. Incidence des modes de transports spécifiques sur la géomorphologie torrentielle

Les formes que l'on trouve dans les torrents sont multiples et liées à une dynamique torrentielle complexe, connaissant des emboîtements d'échelle tant au niveau spatial que temporel. Le paramètre morphologique principal est certainement la pente. En observant de manière globale le bassin versant, l'étude du profil en long du chenal parait incontournable. Généralement, la pente de ce dernier diminue régulièrement vers l'aval. La relation entre la pente et la granulométrie, mise en évidence dans les rivières [Bravard et Petit, 1997 ; Leopold et Wolman, 1957 ; Malavoi et Souchon, 1989], dépend de deux phénomènes dont l'importance respective varie en fonction des matériaux géologiques : l'usure des matériaux lors du transport vers l'aval avec une diminution du diamètre des grains, d'une part ; le tri granulométrique avec une décroissance de la taille vers l'aval, d'autre part [Parker, 1989]. Dans les torrents, la géologie et la lithologie influencent fortement le profil en long où l'on peut localiser des zones en gorge, des seuils naturels (comme les cascades), ou simplement des points durs. La pente locale est directement liée aux divers types d'écoulements qui donnent les formes du lit. Dans la nature, le système hydrologique façonne des formes en lien direct avec sa puissance unitaire d'écoulement [Yang, 1989] ou puissance spécifique [Bravard et Petit, 1997] (*stream power*) ; ainsi la forme du lit des rivières varie de méandres, à lit en tresses puis chenal rectiligne à mesure que la puissance augmente [Leopold et Wolmann, 1957], alors que celle les torrents est rectiligne, avec d'autres formes spécifiques qui se mettent nécessairement en place pour dissiper la forte énergie du torrent.

1.4.1. Les formes liées aux charriages torrentiels

Les formes les plus importantes liées aux charriages torrentiels peuvent être réparties en deux groupes :

- celles qui structurent la couche de matériaux en contact avec le lit. Il s'agit de la granulométrie mais aussi de l'imbrication des éléments entre eux : le pavage et les formes intermédiaires y menant (alternances *marches-cuvettes*) ;
- celles qui créent des modifications de pentes locales par mouvement des matériaux, comme les dunes torrentielles (*dunes à fortes pentes*).

Alors que des alternances de seuils et de mouilles s'observent dans les rivières, lorsque la pente du profil en long augmente, elles font place à ce que l'on nomme marches d'escaliers [Meunier et Bertran, 2001] ou encore marche-cuvette [Bravard et Petit, 1997], traduction du terme anglo-saxon *step-pool*, en raison de l'aspect que prend la surface de l'écoulement à faible débit : les replats (mouilles) alternant avec des cascades de faible hauteur (seuils) (**Cf. Fig. 1-8**). Cette organisation crée des ruptures de pentes dans le profil en long liées à une évolution de la profondeur. Les seuils, moins profonds, regroupent les matériaux ayant la granulométrie la plus élevée [Stüve, 1990]. L'influence des débris végétaux interviendrait également dans leur mise en place [Whittaker et Jaeggi, 1982]. Les cascades indiquent une pente encore plus forte.

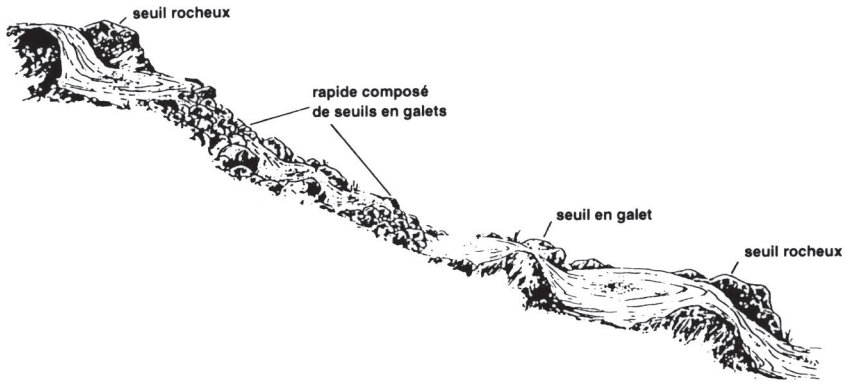


Figure 1-8
Schématisation d'une forme en marche d'escalier (seuils-mouilles) dans un système fluvial torrentiel (d'après Whittaker et Jaeggi, 1982)

La plupart des auteurs considèrent que les marches d'escalier se forment pour des débits intermédiaires, c'est-à-dire suffisamment importants pour déplacer les plus gros grains, mais assez faibles pour permettre l'arrêt d'un amas ou l'arrêt de deux blocs qui s'entraident alors pour résister à l'écoulement ; c'est souvent la cas lors des fins de crue ou des forts débits de fonte [Koulinski, 1994]. Outre l'approche énergétique, où la formation de marches d'escalier minimise l'énergie de l'écoulement, d'autres théories sont avancées [Keller, 1978 ; Lisle, 1987 ; Shaw et KellerHals, 1977], mais pour les plus fortes pentes (au delà de 7,5%), des expérimentations de laboratoire [Ashida *et al*., 1984 ; Whittaker et Jaeggi, 1982] montrent que les gros éléments dominent largement la formation du lit en influençant l'écoulement et en formant des seuils. Une telle structure est irrégulière à cause de la localisation aléatoire des gros blocs. On peut considérer que cette augmentation de la rugosité du lit est une forme de pavage encore très grossière [Gessler, 1965].

Le pavage, parfois nommé armure ou carapace [Malavoi, 1990], désigne les caractéristiques particulières de la couche supérieure du lit. L'exposition permanente de celle-ci à l'écoulement entraîne un tri granulométrique et une imbrication particulière des éléments qui la rend plus résistante à l'érosion [Koulinski, 1994]. Le pavage protège ainsi de l'érosion les matériaux sous-jacents [Bravard et Petit, 1997]. Il existe plusieurs types de pavages [Simon, 1986 ; Suzuki et Kato, 1989], mais le plus courant est le processus où, lors d'une pénurie en matériaux (à l'aval d'un barrage par exemple), l'écoulement va solliciter le lit et mettre à jour des éléments trop grossiers pour être facilement transportés. On le nomme pavage d'exhumation. La pente d'équilibre initiale s'accentue et la concentration en éléments transportés étant de plus en plus réduite, l'érosion a tendance à s'accélérer. C'est alors que par un effet de boucle de rétroaction négative, la pente retrouve lentement sa valeur initiale au fur et à mesure que le débit solide diminue. Ce processus se produit sans doute par paliers avec des restructurations de la surface de plus en plus partielles, jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint, sans transport solide ni érosion [Karim et Kennedy, 1986]. Pour que le pavage se forme, il est nécessaire que la granulométrie soit étendue [Gessler, 1965 ; Little et Mayer, 1976]. On peut mentionner le cas particulier de pavage issu d'apports extérieurs au torrent, comme par exemple la recharge par des zones d'éboulement.

La dune torrentielle [Koulinski, 1994] ou structure en chute et lobe [Grant *et al*., 1990 ; Knighton, 1998 ; Meunier et Bertran, 2001 ; Southard *et al*., 1984] est une structure morphodynamique qui joue un rôle

important à l'échelle du bief torrentiel. Elle se met toujours en place lors de charriage hyperconcentré. Les dunes à fortes pentes sont très peu étudiées et observées dans la nature. L'observation de ces formes est plus aisée en canal de laboratoire ; Mizuyama [1977] a alors pu décrire le phénomène de la façon suivante : "Lorsque les éléments sont grossiers, la surface d'écoulement est réduite et les sédiments transportés depuis les parties amont sont à nouveau déposés et forment une colline. La portion aval de ce dépôt a une pente de 18 à 21°, le sédiment est très grossier et il n'y a pas de surface d'écoulement. Comme la dune se développe, le phénomène continue et la dune s'élève. La pente de la partie amont est de 9 à 13°. Ce phénomène peut être considéré comme intermédiaire entre le transport individuel et l'écoulement de boue. En général, modes de transport collectif et individuel alternent. Ce transport intermédiaire est particulier au mélange sable gravier et il apparaît que, plus l'étendue granulométrique est grande, plus la dune est haute". Les dimensions sur ce modèle réduit laissent imaginer des structures pouvant atteindre cent mètres de longueur avec une variation du niveau du fond de trois mètres. Trois parties bien distinctes que l'on retrouve pour de nombreux mouvements en masse et qui ne sont pas sans rappeler les trois zones du bassin versant idéalisé qu'est le système fluvial (**Cf. Fig. 1-1**) :

- un entonnoir concave qui collecte les filets liquides et s'étend à l'amont par érosion régressive, s'agrandissant et collectant ainsi le matériau solide,
- un canal central approximativement rectiligne, où les éléments grossiers donnent l'impression de se déplacer aussi vite que l'eau sur un lit tapissé de matériaux relativement fins,
- un lobe ou cône terminal, en aval du canal central, où s'étalent et s'infiltrent les filets liquides, ce qui oblige les éléments grossiers à s'arrêter et dicte l'extension vers l'aval du lobe [Meunier et Bertran, 2001].

Koulinski [1994] indique les conditions nécessaires à leur formation : un débit suffisant pour amorcer et entretenir le phénomène, une granulométrie étendue, une surface disponible pour développer un cône de dépôt à l'aval. Lors de ses expériences en canal (**Cf. Fig. 1-9**) une dune particulièrement grande a pu se développer parce que les bords du modèle ont permis la stabilisation des écoulements sur une durée assez longue pour sa formation ; dans la nature elle aurait environ 350 mètres de long avec une élévation du lit limitée à quelques mètres.

Figure 1-9
Dunes à fortes pentes. A gauche, dune de grande ampleur lors d'un essai en canal de laboratoire (plate-forme Sogreah) ; à droite, reste probable d'une dune sur le cône de dépôt du Rabioux de Châteauroux (affluent de la Durance en amont d'Embrun, Hautes-Alpes) (clichés V.Koulinski)

Dans les torrents, où la pente est forte et le chenal relativement contraint, les dunes torrentielles évoluent vers une structure marche-cuvette, comme le montrent les expérimentations en laboratoire de Whittaker et Jaeggi [1982]. Mais Mizuyama [1977] indique aussi "des phénomènes de dunes glissantes de type debris flow" qui rendent les processus de mise en place des dunes à fortes pentes assez proches des écoulements de laves torrentielles, dont ils peuvent faciliter la formation dans le lit du chenal. Les conditions de mise en place des formes de dunes à fortes pentes font que leurs observations sur des torrents sont assez rares (**Cf. Fig. 1-9**) ; de plus il est facile de les confondre avec des dépôts de lave torrentielle.

1.4.2. Les formes liées aux laves torrentielles

Le passage d'une lave torrentielle dans un torrent est beaucoup plus morphogène que les autres écoulements et laisse des formes caractéristiques. L'observation des différentes phases lors du passage d'une lave en un point donné du chenal permet de décomposer les formes qui leur sont associées et que l'on retrouve plus ou moins partiellement après l'événement. La **figure 1-10** retrace une séquence en cinq phases représentatives d'un événement ou d'une bouffée de moyenne ampleur qui ne déborde pas du chenal :

- la phase pré-événement (**Cf. Fig. 1-10 A**) : la première phase représente l'état avant l'arrivée de la lave torrentielle où sont visibles des formes laissées par des événements précédents comme les levées latérales. Comme c'est le cas la plupart du temps, l'écoulement est très faible et parfois même non visible en surface.
- la phase frontale (**Cf. Fig. 1-10 B**) : Le front apparaît, composé de matériel plus grossier que le corps. Les gros blocs qui le composent ne sont pas entièrement baignés par la matrice. Ses caractéristiques rhéologiques sont différentes de celles du corps. La section occupée pendant le passage du front peut correspondre à la section maximum d'écoulement, ou s'en rapproche. Le front est parfois accompagné de fortes turbulences, créant un nuage d'embruns boueux au-dessus du flot d'écoulement. Le passage du front dure souvent moins de 10 secondes. Il est parfois précédé par un pré-front, à l'allure d'un écoulement hyperconcentré qui pourrait provenir d'une chasse du liquide interstitiel du lit due à la surcharge provoquée par la lave torrentielle [Tognacca *et al*., 2000]. Ce pré-front n'est pas toujours bien observable. Bien que cette phase soit la plus spectaculaire, le front laisse peu de formes visibles (sauf lors d'un arrêt en masse de la lave).
- La phase principale (**Cf. Fig. 1-10 C**) : le corps de la lave s'écoule le plus souvent pendant plusieurs minutes, bien que dans des torrents particuliers, cet écoulement puisse durer plus d'une heure. C'est durant cette phase, dans la masse du corps constituée d'un mélange d'eau et de matériaux enrobés d'une matrice fine, que la lave développe toute sa puissance. Tel un bulldozer, elle pousse le front à l'avant, laissant apparaître des bourrelets latéraux dans des zones de moindre énergie. La section en travers qui dans les cours d'eau a généralement un profil en V, a tendance à être érodée selon un profil en U.

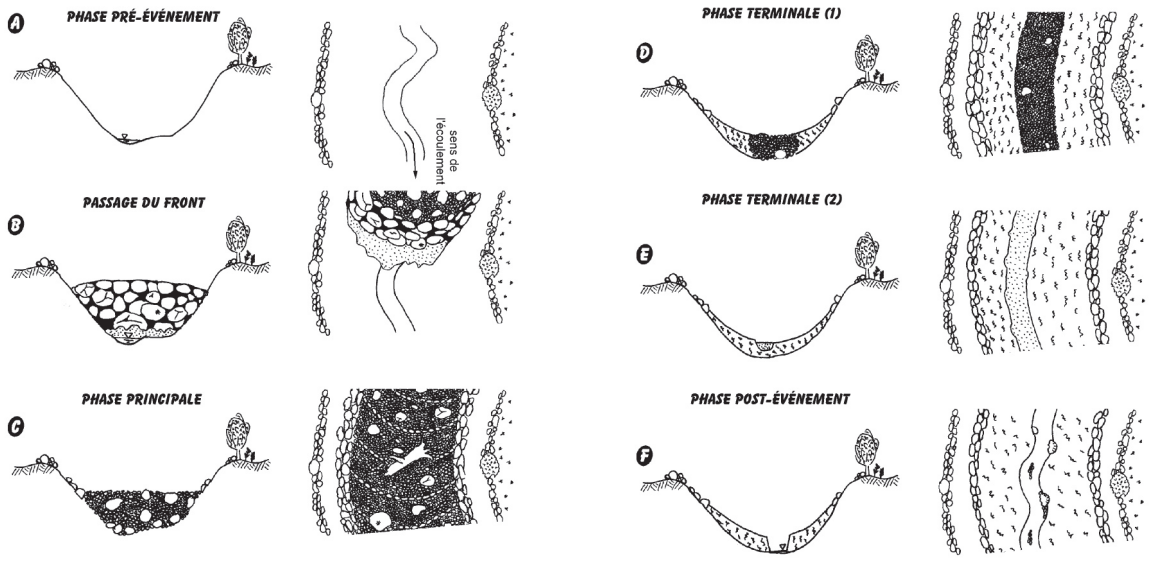


Figure 1-10
Les différentes phases du passage d'une lave torrentielle, en coupe et en plan, montrant les différentes formes associées (Bardou, 2002)

- la phase terminale (**Cf. Fig. 1-10 D et E**) : la queue de la lave torrentielle fait suite au corps. L'écoulement perd de sa puissance, devenant moins épais et moins large, et s'écoule dans un chenal encombré des matériaux déposés précédemment par le corps de la lave. La partie encore en écoulement est plus fluide que le corps et n'est déjà plus capable de transporter les gros blocs qu'en les roulant sur le fond. Si l'événement est dû à de fortes pluies ou qu'il s'est déroulé dans un torrent à débit permanent, la queue devient toujours plus fluide pour devenir un écoulement hydraulique fortement chargé (couple E). Elle s'écoule et commence à éroder les matériaux déposés par le corps de la lave.
- la phase post-événement (**Cf. Fig. 1-10 F**) : pour finir, l'écoulement de la décrue ainsi que les écoulements postérieurs de type fluviatile incisent les dépôts de la lave. Ainsi ces phases successives d'érosion et de dépôt donnent aux torrents ayant connu des laves torrentielles des profils en travers avec une forme générale en auge (**Cf. Fig. 1-11**).

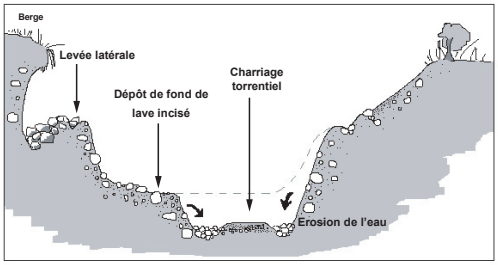


Figure 1-11
Formes caractéristiques du chenal à laves torrentielles, avec un profil en travers en "auge": représentation schématique (LeMéhauté, 2000), et exemples du chenal du Manival en aval du barrage RTM n°30 et de la baraque forestière (clichés S.V-C.)

Durant le passage d'une lave torrentielle, la densité du fluide peut être deux fois plus forte que celle d'un écoulement fluviatile, et la profondeur hydraulique est fréquemment trois fois plus élevée. Exerçant des contraintes de cisaillement six fois plus élevées qu'un écoulement fluviatile [Selby, 1993], les laves sont par conséquent responsables de la forte ablation dans les chenaux qu'elles empruntent. Des lois rhéologiques, ou lois de comportement, ont été élaborées pour modéliser ce phénomène. On peut distinguer deux grandes familles de modèles en rapport avec la classification rhéologique (**Cf. Tab. 1-7**) : le premier groupe considère l'écoulement comme laminaire, les modèles qui lui sont associés sont donc mieux adaptés aux "coulées boueuses" c'est-à-dire les laves torrentielles avec une forte proportion d'argile formant une matrice. Parmi ceux-ci, les modèles de Newton, de Bingham [Bingham et Green, 1919] et de Herschel et Bulkley [Herschel et Bulkley, 1926] sont les plus utilisés. Le modèle de Bingham est assez simple car il considère que le régime de l'écoulement reste permanent, alors que le modèle de Herschel-Bulkley qui prend en compte les variations temporelles du réseau d'interaction entre les particules d'argile au cours de l'écoulement est plus délicat à utiliser. Le second groupe est adapté aux "coulées de débris", laves torrentielles avec une proportion d'argile moindre et dont l'interaction et les collisions entre particules prédominent dans l'écoulement. Les équations frictionnelles de Coulomb sont alors utilisées. Le modèle du "fluide dilatant" de Takahashi [1978] élaborée pour des "coulées de débris grossiers" ayant des vitesses supérieures à deux mètres par seconde, a été remis en cause vis-à-vis de sa fiabilité [Coussot et Meunier, 1996]. L'approche rhéologique est contestée car, pour une même lave torrentielle, la partie centrale devrait être traitée par un modèle du premier groupe, et les bourrelets latéraux ou le front, composés de blocs, par un modèle du second groupe [Iverson, 2003]. Mais le modèle de Bingham semble toutefois bien s'appliquer aux laves torrentielles des Alpes du nord, qui ont des matrices argileuses, et permet d'expliquer les formes en U caractéristiques des profils en travers [Desloges, 1992 ; Johnson, 1970]. La **figure 1-12 A** montre la répartition des forces de cisaillement pour un profil en travers de forme rectangulaire, les parties sombres représentant des zones de très faible capacité érosive. Par simple rotation du profil, les résultats de ce calcul ont ensuite été adaptés à un profil en travers de forme triangulaire représentant un chenal montagnard profondément incisé par les écoulements fluviatiles (**Cf. Fig. 1-12 B**). On obtient alors la représentation de l'écoulement dans un profil en travers (**Cf. Fig. 1-12 C**), avec deux zones d'érosion matérialisées par la partie claire. "Plug" représente la partie centrale de l'écoulement où semblent généralement flotter d'énormes blocs, et "Dead region" correspond à des zones de dépôt comme les levées latérales (**Cf. Fig. 1-12 1 et 2**). Comme dans la nature, le chenal à section triangulaire est ainsi transformé en une section rectangulaire avec des dépôts latéraux et au centre, comme pour l'érosion des glaciers ou des coulées de lave volcanique. La modélisation du passage de plusieurs bouffées de lave torrentielle donne un transect avec de multiples levées latérales (**Cf. Fig. 1-12 3**).

L'érosion des laves torrentielles permet de remobiliser des sédiments du chenal qui se sont parfois accumulés durant des décades voire des millénaires. Les écoulements fluviatiles, plus fréquents, n'ont pas la même capacité de transport des matériaux que les laves torrentielles qui peuvent inciser les sédiments jusqu'à la roche en place [Benda, 1990 ; Wohl et Pearthree, 1991]. En effet, la lave arrive bien

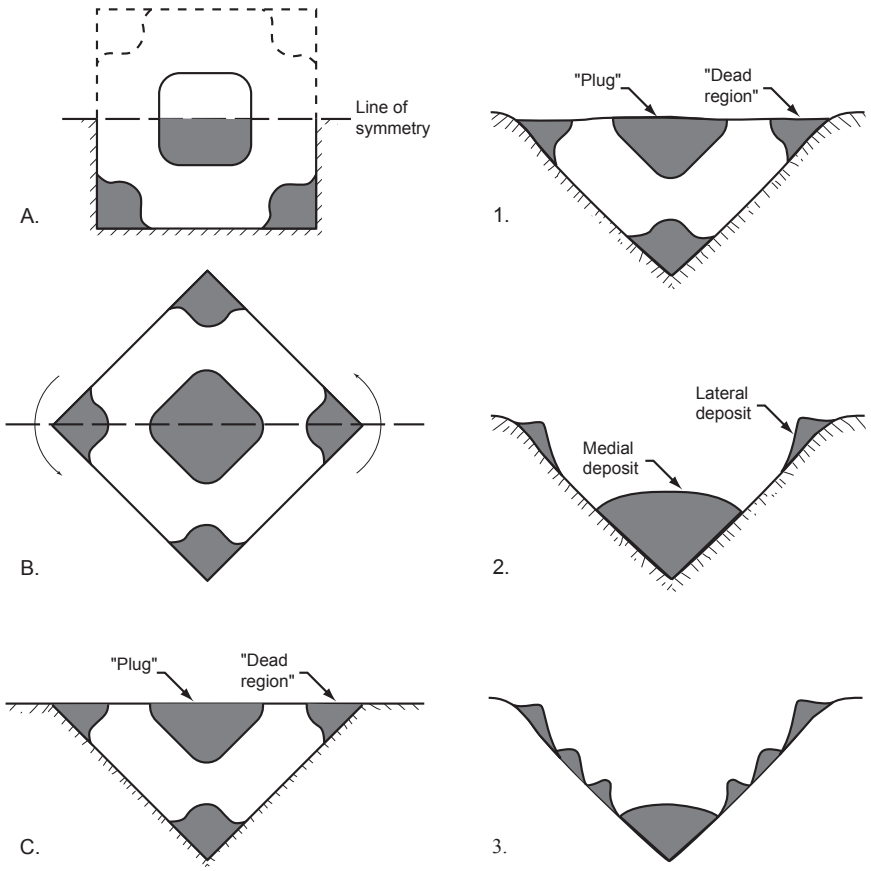


Figure 1-12
A, B, C, utilisation du modèle rhéologique de Bingham dans un chenal à section rectangulaire et adaptation à une section triangulaire ; 1, 2, 3, modélisation d'une succession d'événements créant de multiples levées latérales (d'après Johnson, 1970)

souvent à détruire le pavage du fond et il en résulte un approfondissement du chenal bloqué uniquement par les points durs du profil en long [Zicheng et Jing, 1987]. Bien que représentant une part moindre dans l'érosion du chenal, de l'ordre de 20%, le charriage hyperconcentré est toutefois plus efficace sur l'érosion des berges [Lavigne *et al*., 2003 ; Rodolfo et Arguden, 1991 ; Wohl, 2000]. L'efficacité géomorphologique des laves torrentielles en terme de transport sédimentaire et de modification de la morphologie du chenal est fonction du temps de retour de celles-ci en lien avec la production sédimentaire ; plus deux laves successives sont éloignées dans le temps, plus les modifications du chenal torrentiel lié à l'événement seront visibles [Wohl et Pearthree, 1991].

Les volumes de matériaux déposés par les laves torrentielles peuvent être très conséquents (**Cf. Tab. 1-2**). Ils sont généralement localisés dans les zones du chenal ayant une réduction de pente ou un élargissement significatif [Benda, 1990]. A la confluence avec la rivière aval et/ou dans les plaines alluviales, ils peuvent être une source importante de sédiments grossiers [Cenderelli et Kite, 1998 ; Rutherfurd *et al*., 1994]. Les dépôts prennent la forme de cônes de déjections à l'aval, et de levées latérales et terrasses le long du chenal [Hewitt, 1998]. Les cônes de déjections se forment par une succession de dépôt en masse de laves torrentielles ou de chacune de leurs bouffées. Ces accumulations forment des *lobes* [Johnson, 1970] et détournent l'écoulement suivant, créant à la longue un cône en

forme d'éventail (*debris fan*). Le cône est un élément qui intègre l'activité torrentielle sur le long terme ; par exemple lorsque celui-ci est fréquemment parcouru par des laves torrentielles, sa pente est plus forte avec une rugosité plus élevée [Beaty, 1989 ; Hooke et Rohrer, 1979 ; Ikeda *et al*., 1993 ; Whipple et Dunne, 1992]. En fonction du volume et des caractéristiques internes, les lobes peuvent également se déposer dans le chenal mettant ainsi en place des cycles d'accumulation et de reprise des matériaux au sein du chenal, en fonction de la fréquence des laves torrentielles et de la production sédimentaire [Benda et Dunne, 1987 ; Bovis et Dagg, 1987 ; Wieczorek *et al*., 1989]. Ces cycles ont une influence sur la forme du chenal, le régime hydraulique, la végétation riparienne ainsi que les pentes du chenal et des versants [Florsheim *et al*., 1991 ; Hewitt, 1998 ; Reid et Dunne, 1996 ; Swanson *et al*., 1987]. En fin de crue ou après celle-ci, la capacité des écoulements fluviatiles à remobiliser les dépôts de lave torrentielle dépend directement de la surface de drainage du bassin versant, les rivières un peu plus importantes, d'ordre trois, ne conservant les dépôts distincts de lave que quelques années après l'événement [Wohl et Pearthree, 1991]. Ce sont ces incisions qui mettent en place des terrasses correspondant aux dépôts du corps de la lave torrentielle et qui laissent apparaître des coupes verticales permettant d'observer la granulométrie interne.

La différentiation des dépôts sédimentaires laissés par les trois principaux types d'écoulements torrentiels ("coulée de débris", charriage hyperconcentré et charriage torrentiel) qui peuvent se relayer au cours d'un seul événement de lave torrentielle, est difficile. Elle repose sur la fabrique des clastes (i.e. l'orientation du grand axe des particules par rapport à l'écoulement), la morphologie des dépôts, la granolumétrie, le tri et la stratification. La phase "coulée de débris" a tendance à laisser des dépôts sans orientation particulière des matériaux, bien qu'en théorie l'écoulement laminaire puisse orienter les éléments allongés parallèlement à la direction de l'écoulement [Innes, 1983 ; Tricart, 1957 ; Waldron, 1967] ; alors que les charriages laissent des dépôts où le grand axe des clastes est incliné vers l'amont en raison des turbulences de l'écoulement [Cenderelli et Kite, 1998 ; Cenderelli et Wohl, 1998 ; Enos, 1977 ; Innes, 1983 ; Lavigne et Thouret, 2000 ; Waythomas et Jarrett, 1994]. Les laves torrentielles sont caractérisées par des bourrelets frontaux et latéraux qui ont des faces externes composées de blocs à structure ouverte, alors que les faces internes comprennent des fragments de toutes tailles emballés dans une matrice argileuse (*matrix supported*) ; par contre les charriages laissent des bordures avec des surfaces horizontales et un tri des blocs [Costa et Jarrett, 1981]. Les dépôts de ces charriages de torrent restent assez mal triés mais ils n'ont pas de matrice et on observe tout de même une certaine stratification et classification [Bull, 1977; Hooke, 1967 ; Janda *et al*., 1981]. Une caractéristique importante du dépôt de lave torrentielle est la grande hétérogénéité granulométrique avec la présence de gros blocs dont les sédiments sont mal triés à l'intérieur [Bull, 1963 ; Fink *et al*., 1981 ; Sharp et Nobles, 1953 ; Suwa *et al*., 1973 ; Waldron, 1967]. Paradoxalement, en surface il présente souvent une répartition très homogène constituée des particules les plus grossières, sans même qu'une matrice argileuse ne soit visible sur une épaisseur variant de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres de la surface. Ceci s'explique par le fait que la pression de dispersion sur une particule donnée étant proportionnelle au carré du diamètre de cette particule, les clastes les plus volumineux

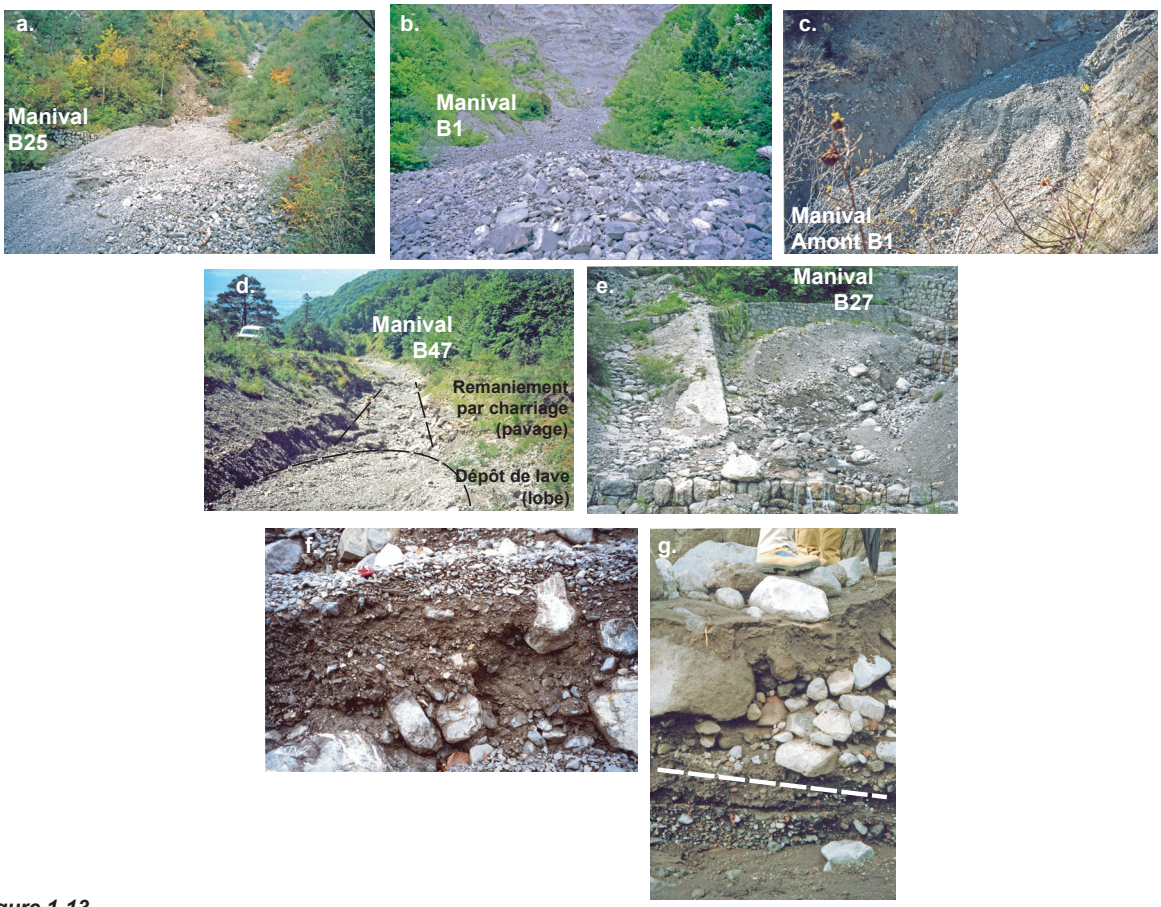


Figure 1-13
Exemples de formes liées aux transports sédimentaires par laves torrentielles et par charriage, en surface (a. à e.) et à l'intérieur du dépôt (coupes f. et g.). On peut observer des dépôts de micro-laves torrentielles en forme de lobes (a. à d.) et la mise en place d'un pavage par le remaniement des matériaux sous forme de charriage (d. et e.). Les coupes montrent l'intérieur de dépôts de laves torrentielles (f. et partie haute de g.) contrastant avec les dépôts d'écoulement fluviatile (partie basse de g.) (Clichés S.V-C.)

sont les plus affectés par le phénomène, ce qui contribue à leur migration vers le haut et le front [Selby, 1993]. De même, les écoulements de charriage se produisant entre les événements de lave torrentielle mettent en place un pavage qui offre à la vue une grande hétérogénéité granulométrique en surface, alors qu'en interne les dépôts sont mieux triés. La **figure 1-13** montre quelques exemples de dépôts en lobe de lave torrentielle

Pour répondre à la problématique posée, il était nécessaire de se placer dans le contexte étudié, par le biais de la littérature spécialisée. Actuellement, le risque torrentiel reste un problème présent pour les sociétés vivant dans des zones de montagne, car le volume de sédiments apporté par les crues fait de nombreux dégâts. Plus que d'autres paramètres, la prévision du volume transité semble être primordiale et c'est dans cette voie que s'oriente notre travail. Il était donc important de connaître le fonctionnement des crues torrentielles et de pouvoir reconnaître les formes qui leur sont associées. Dans les paragraphes suivants, nous allons poursuivre l'analyse bibliographique pour tenter d'expliquer le fonctionnement de la dynamique sédimentaire au sein d'un bassin versant torrentiel d'une part, et pour faire, d'autre part, un état de l'art des différents outils actuellement disponibles en ingénierie pour les gestionnaires en charge de la protection contre les risques torrentiels

2. Les concepts du fonctionnement torrentiel

Le milieu naturel étant fort complexe et diversifié, il est nécessaire de modéliser les grandes lignes de son fonctionnement pour le comprendre. L'approche systémique permet d'appréhender ce type de milieu dans sa globalité en tenant compte des interactions toujours présentes entre systèmes ou sous-systèmes. C'est dans les années cinquante [Strahler, 1950] que la théorie des systèmes a été introduite dans l'analyse des bassins versants. L'approche systémique des cours d'eau et de leurs espaces fonctionnels suit actuellement deux concepts complémentaires : 1) le système fluvial, concept de référence qui formalise les interrelations entre le cours d'eau et son bassin versant [Schumm, 1977], 2) l'hydrosystème fluvial, focalisé sur les échanges de matière et d'énergie entre la rivière et sa plaine alluviale [Amoros et Petts, 1993]. Ces deux approches sont fortement complémentaires. Le système fluvial est un concept purement géomorphologique, centré sur l'organisation spatiale des transferts de sédiments dans les bassins versants qui explique le découpage longitudinal de ces derniers en trois zones : zone de production, zone de transfert et zone de stockage, que nous avons déjà évoquées. L'hydrosystème constitue un sous-ensemble du système fluvial qui se consacre principalement au fonctionnement écologique, en prenant en compte de manière plus spécifique les échanges transversaux entre la rivière et ses annexes [Liébaut, 2003 ; Piégay et Schumm, 2003]. Notre objet d'étude nous a poussé à négliger cette seconde approche, la prise en compte des relations étroites entre les différentes zones fonctionnelles amont-aval étant prédominante dans le bassin versant torrentiel.

Un des concepts fondamentaux du système fluvial est l'ajustabilité des formes fluviales aux flux liquides et solides [Knighton, 1998], qui tendent au cours du temps vers un équilibre dynamique, défini comme un état moyen autour duquel le système fluctue. Ce comportement du système dit "à processus-réponse" permet par des processus internes entre différents sous-systèmes, processus que l'on nomme boucles de rétroactions négatives [Petts et Bravard, 1993], d'ajuster en permanence le système par rapports aux modifications des flux entrants afin de conserver un équilibre dynamique [Chorley, 1962 ; Hack, 1960]. Cela peut être illustré par l'exemple suivant : l'érosion d'un chenal torrentiel lié à l'augmentation du débit lors d'une crue ou à la diminution de l'apport sédimentaire due au piégeage des sédiments par des ouvrages dans le chenal, va entraîner un déficit sédimentaire pour ce tronçon et donc un déséquilibre. Le résultat va se manifester par une érosion importante en fond de chenal et un abaissement de celui-ci. Par mécanisme de rétroaction, il peut alors se produire une érosion latérale qui réduira la profondeur relative et augmentera la rugosité, amoindrissant ainsi la capacité de transport des sédiments afin de tendre à nouveau vers un équilibre dynamique [Bravard et Petit, 1997 ; Marston, 1993 ; Peiry, 1990]. La capacité du système à rétablir des conditions proches de son état initial après perturbation est qualifiée de résilience. Le temps de réaction, période nécessaire à la mise en œuvre de l'ajustement, et le temps de relaxation, durant lequel le système retrouve des conditions d'équilibre dynamique, constituent le temps de réponse qui est fonction de l'état de connexion entre les différents compartiments du système (**Cf. Fig. 1-14**). La résistance du système aux forçages externes est bien décrite par le concept de sensibilité du paysage (landscape sensitivity) [Brunsden, 2001 ; Brunsden et Thornes, 1979] auquel on peut ajouter l'influence des actions anthropiques sur le milieu [Liébaut, 2003].

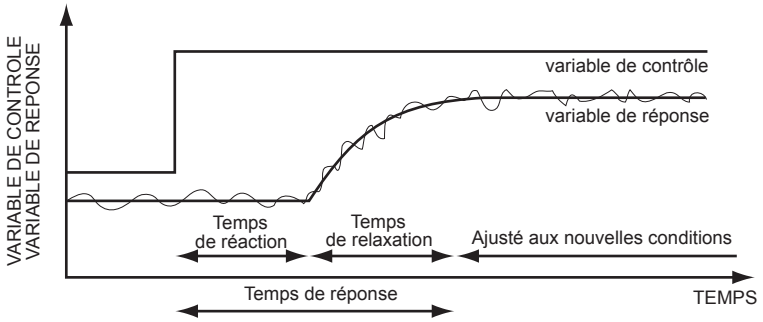


Figure 1-14
Représentation théorique de la réponse fluviale à une modification brutale d'une variable de contrôle (d'après Knighton, 1998)

Les interventions humaines sur le cours d'eau (extractions, curages, endiguements,…) complexifient les règles qui régissent le fonctionnement interne du système et lorsque certains seuils sont dépassés, l'effet de résilience peut être brisé.

Un second concept fondamental est omniprésent dans l'approche du système fluvial : les emboîtements d'échelles spatiales et temporelles. Schumm et Lichty [1965] ont défini trois types d'échelles temporelles d'une influence particulière : géologiques, historiques (10 à 100 ans), et courtes (jours, années). Effectivement, en fonction de l'échelle adoptée, les variables ne sont pas dépendantes de la même manière. Par exemple, à une échelle de temps courte, débits et vitesses sont déterminés par la morphologie du chenal, alors qu'à une échelle de temps historique, la morphologie du chenal est sous la dépendance des débits liquides et solides moyens et maxima. Il en est de même pour les échelles spatiales (**Cf. Fig. 1-15**). Dans le même ordre d'idée, on peut dire que le torrent relève des mêmes concepts qu'un grand fleuve, à une mésoéchelle.

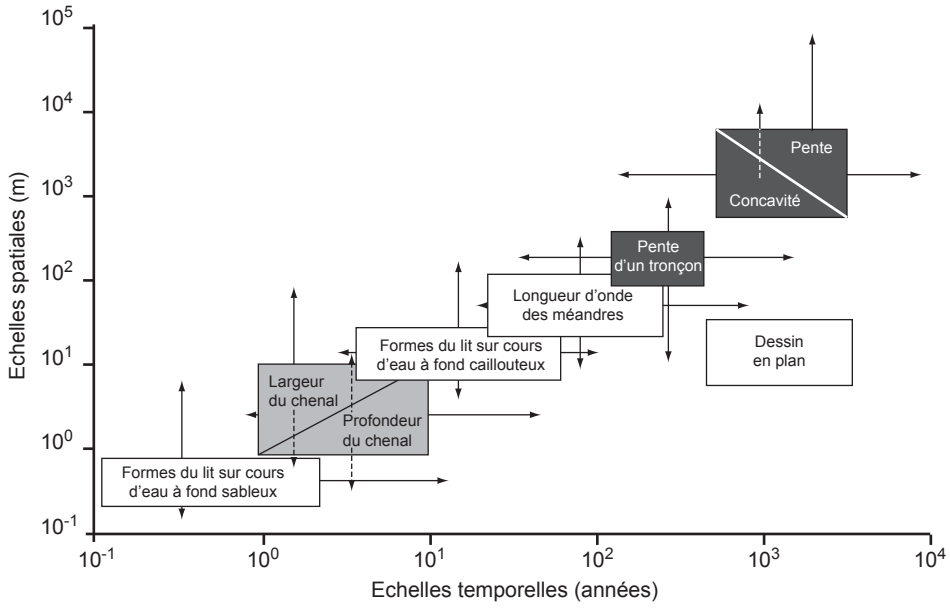


Figure 1-15
Echelles spatiales et temporelles de l'ajustement des formes fluviales (d'après Knighton, 1998)

2.1. Complexité du transport solide au sein du système torrentiel

L'expérience montre que dans les bassins versants, en particulier dans les bassins de réception, il existe un grand nombre de processus assurant le déplacement des sédiments après la météorisation de ceux-ci. Ces différents processus géomorphologiques sont recensés et décrits dans la plupart des manuels de géomorphologie [Derruau, 1988 ; Tricart, 1977]. Les plus actifs rencontrés dans les bassins torrentiels des Alpes du nord sont :

- le ravinement, généralement localisé dans les zones dénudées de tête de bassin versant ;
- les écroulements et chutes de blocs, provenant généralement de barres rocheuses aux formations géologiques fragilisées par la fracturation ;
- les érosions de berges, dont l'activité est fortement liée à la dynamique verticale du chenal et qui peuvent remonter au niveau des versants dans des matériaux meubles ou très friables ;
- les glissements de terrain, capables de mobiliser de gros volumes de matériaux notamment lorsqu'ils affectent les flancs des chenaux d'écoulement torrentiel ;
- les processus liés à la neige, en particulier lors de sa fusion (avalanches de fonte).

Ces processus ont chacun une dynamique propre, indépendante de celle des autres, avec des temps et des fréquences de transit des matériaux très variables de l'un à l'autre. Bien souvent, ils se relaient pour acheminer les matériaux jusque dans le talweg. Il est ainsi possible que des débris soit stockés et maintenus immobiles durant de nombreuses années avant d'être remis en mouvement par un autre processus [Tricart, 1960]. On constate alors que de nombreuses zones de production sédimentaire sur les versants sont, à un moment donné, déconnectées du réseau de drainage torrentiel [Harvey, 1991 ; Harvey, 1994 ; Hegg *et al*., 1996]. A ces processus de versant se substitue ensuite le transport des matériaux jusqu'à l'exutoire du bassin versant, lié au fonctionnement torrentiel. La dynamique sédimentaire sur l'ensemble du bassin est ainsi très complexe et l'efficacité de la production sédimentaire n'est pas du tout homogène, ni dans le temps, ni spatialement sur le bassin.

De nombreuses observations de terrain ont montré que la quantité de matériaux disponibles était un élément primordial dans le déclenchement des laves torrentielles [par exemple, Bovis et Jakob, 1999 ; Peiry, 1990 ; Remaître *et al*., 2002 ; Van Steijn *et al*., 1988]. Pourtant, la connaissance des transports solides nous semble être, à l'heure actuelle, le maillon faible dans la mise en place d'outils de prédiction fiables. Par exemple, une étude sur les torrents de l'Arve a montré l'influence de la fourniture sédimentaire, outre le flux liquide, comme facteur d'instabilité [Peiry, 1990 ; Peiry, 1988]. De la même manière, une modélisation statistique sur des torrents canadiens de Colombie Britannique met en évidence la prépondérance des apports sédimentaires sur les débits liquides dans la production de crues [Bovis et Jakob, 1999]. On pourrait imaginer de suivre tous les processus de transport solide du bassin versant et leurs interactions pour mieux comprendre ces mécanismes et par la suite, d'élaborer des modèles de prédiction du transport solide. Le problème d'une telle approche est la lourdeur de sa mise en œuvre pratique, qui demanderait un suivi régulier, fréquent, à des échelles de temps et d'espace fines, sur l'ensemble d'un bassin versant et pendant de nombreuses années. Après réflexion,

il nous a semblé plus judicieux de s'intéresser uniquement à la dynamique d'accumulation sédimentaire dans les zones qui participent directement aux transports solides torrentiels, c'est-à-dire dans le lit torrentiel ; et cela, quels que soient les processus géomorphologiques de versant qui ont permis la recharge en matériaux du chenal.

2.2. Représentation conceptuelle du fonctionnement de la dynamique sédimentaire

2.2.1. Limite de stabilité au sein du bassin versant

La voie la plus instructive pour l'exploration du fonctionnement des systèmes torrentiels est celle qui consiste à analyser et à comprendre les mécanismes de dépôt et de reprise des sédiments. Le graphique de la **figure 1-16** présente un schéma conceptuel essentiel pour notre étude, puisqu'il met l'accent sur les mécanismes de stabilité et d'instabilité des bassins versants. Elaboré dans les années soixante dix [Heward, 1978 ; Schumm, 1973], il a été repris depuis par des chercheurs contemporains [Bardou, 2002 ; Bonnet-Staub, 1998 ; Kienholz et Mani, 1996 ; Zimmermann *et al*., 1996 ; Zimmermann *et al*., 1997]. Comme le schéma le montre, trois éléments principaux déterminent le déclenchement du transport solide :

- des paramètres physiques du bassin versant,
- des variables sédimentaires,
- des facteurs hydrométéorologiques.

A. Les paramètres physiques : facteur de prédisposition permanent.

La description détaillée de chacun de ces éléments permet de comprendre pourquoi la recharge sédimentaire est l'élément-clé du fonctionnement torrentiel.

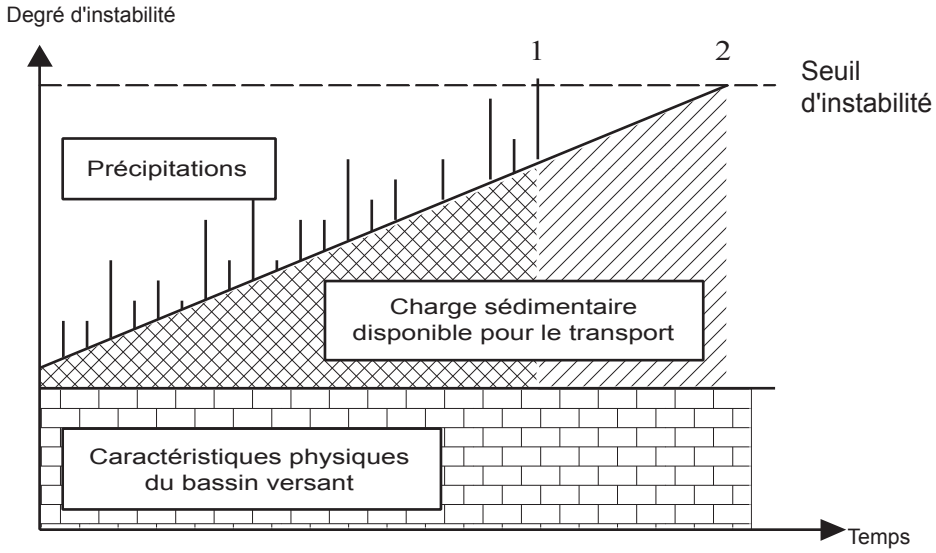


Figure 1-16
Représentation graphique du concept de stabilité du système torrentiel (d'après Schumm, 1973 et Heward, 1978, modif.)

A la base du schéma (**Cf. Fig. 1-16**), sont matérialisées les caractéristiques physiques du bassin versant. Cette catégorie de variables du bassin comprend généralement des paramètres morphométriques à petite échelle, telles que la taille du bassin versant, la pente moyenne, celle du cône de déjection, ainsi que des paramètres géologiques ou environnementaux, tels que la fragilité lithologique et le taux de boisement du bassin. Pour simplifier, cela représente la sensibilité du bassin versant à la production de sédiment. Certains de ces paramètres peuvent évoluer quand on les considère à une échelle de temps longue, comme par exemple les pentes ou la nature du couvert végétal. Par contre, à l'échelle de temps courte (quelques décennies) mieux adaptée à l'étude des risques, ils peuvent le plus souvent être considérés comme constants. C'est pourquoi la représentation graphique de ces facteurs de prédispositions permanents est parallèle à l'axe des abscisses, plus ou moins proche du seuil d'instabilité torrentielle selon le bassin versant considéré. Comme nous le verrons par la suite, les formules globales d'estimation des transports solides n'utilisent que ces paramètres et se placent donc à une échelle de temps trop longue, inadaptées à la gestion des risques torrentiels. Ce type de données indique seulement que le torrent a une prédisposition plus ou moins forte à se trouver dans des situations de déséquilibre ; ainsi les petits bassins à pente forte génèrent dans l'ensemble plus de laves torrentielles que les autres.

B. Les variables sédimentaires : facteur principal d'instabilité.

La charge sédimentaire disponible pour le transport (**Cf. Fig. 1-16**) constitue le principal facteur d'instabilité. C'est la production de débris mis au service de la torrentialité, c'est-à-dire venant s'accumuler dans le réseau de drainage torrentiel, qui va déterminer une grande partie de la sensibilité du système torrentiel. Dans le schéma, la pente de la droite augmente en fonction de la recharge sédimentaire jusqu'à atteindre le seuil d'instabilité et donc le déclenchement du transport solide vers l'aval (point 2 sur le graphique). L'exemple d'école de ce processus est la théorie de l'évolution du tas de sable [De Gennes, 1999 ; Guyon et Troadec, 1994] ; l'expérience consiste à faire tomber régulièrement du sable sur le plateau d'une balance. Petit à petit le sable forme un tas dont la pente augmente lentement. Puis, à partir d'un certain temps, le tas de sable ne grossit plus, les grains ne s'accumulent plus mais s'écoulent hors du plateau. Le tas de sable a atteint son état critique. Quand cet état critique, mesurable par l'angle du tas de sable est dépassé, des avalanches de toutes tailles se produisent (des petites et des grandes) bien que l'apport de sable soit constant et se fasse grain par grain [Dauphiné et Provitolo, 2003]. Dans le cas des torrents, le fonctionnement est plus complexe et le seuil d'instabilité, tout comme la pente de la droite, sont difficiles à quantifier, car la granulométrie est très étendue et d'autres facteurs externes interviennent.

C. Les variables hydrométéorologiques : facteur ponctuel et temporaire d'instabilité

Les précipitations, ou plus généralement les conditions hydrométéorologiques, constituent un facteur ponctuel et temporaire d'instabilité. Ainsi voit-on sur la **figure 1-16**, qu'en fonction de l'ampleur de

l'événement pluvieux, le seuil d'instabilité pourra parfois être atteint (point 1 sur la figure) mais cela dépend aussi des deux autres éléments du schéma : l'un fixe, les caractéristiques physiques du bassin, et l'autre variable, la recharge sédimentaire. Cette dernière variable est donc la plus déterminante puisque si le chenal est fortement chargé en matériaux meubles, l'ensemble du système est proche du seuil d'instabilité et une pluie de faible ampleur aura la capacité de déclencher un événement de transport solide (crue torrentielle). C'est la caractéristique d'un système placé dans un état critique [Guyon et Troadec, 1994] proche du seuil d'instabilité, à l'image du déclenchement des avalanches en montagne (de neige ou autres matériaux granulaires) qui est extrêmement sensible à de faibles perturbations comme le passage d'un skieur ou la chute de pierres.

Ce schéma conceptuel s'adapte bien à l'approche systémique puisqu'il est possible de l'appliquer à toutes les échelles du système torrentiel, à l'ensemble du bassin versant, mais aussi à des sous bassins versants ou même encore à des ravines. Il constitue un des fondements de notre travail de recherche.

2.2.2. Les facteurs du déclenchement des transports solides : deux grands types de torrents

La relation entre l'occurrence de laves torrentielles et celle de précipitations extrêmes a été constatée depuis fort longtemps de façon empirique par les forestiers. Des travaux proposent des seuils d'intensité/durée des précipitations contrôlant le déclenchement des laves [Blijenberg, 1998 ; Caine, 1980 ; Okuda *et al*., 1980]. Mais toutes les relations ne semblent pas fiables. Par exemple, Van Dine [1985] a étudié l'intensité des pluies de Colombie Britannique au Canada et les résultats montrent que les périodes de retour des orages susceptibles de déclencher une ou plusieurs laves sont de 2 à 5 ans, alors que l'occurrence des laves torrentielles est bien supérieure. L'auteur a discuté ces résultats et mis en avant quelques explications possibles comme le manque de précision des données pluviométriques lié au caractère très ponctuel des orages ou la mauvaise évaluation du rôle de la fonte des neiges et de celui des pluies antérieures dans l'imbibition des terrains. L'absence de prise en compte des processus de recharge sédimentaire du bassin versant, élément central du fonctionnement torrentiel comme nous avons pu le voir précédemment, parait être une autre explication possible. Pourtant, dans certains cas, il arrive aussi que les corrélations entre les événements pluviométriques et les crues torrentielles soit bonnes. Cette contradiction apparente peut être résolue si l'on opère une distinction entre deux grands types de torrents (**Cf. Fig. 1-17**) :

- ceux où le transport solide est lié au dépassement d'un seuil extrinsèque hydrométéorologique ;
- ceux où le transport solide est lié au dépassement d'un seuil intrinsèque géomorphologique.

Cette différenciation a d'abord été montrée par Stiny [1910], puis en Angleterre exprimée par Carston et Kirkby [1972] qui séparent alors les bassins selon les termes anglo-saxons *transport-limited*, ayant une fourniture en matériaux qui peut être considérée comme illimitée, et *weathering-limited*, avec des taux de recharge plus faibles. Bovis et Jacob [1999] ont classé de nombreux torrents canadiens selon ces critères afin d'élaborer un modèle statistique pour chaque classe.

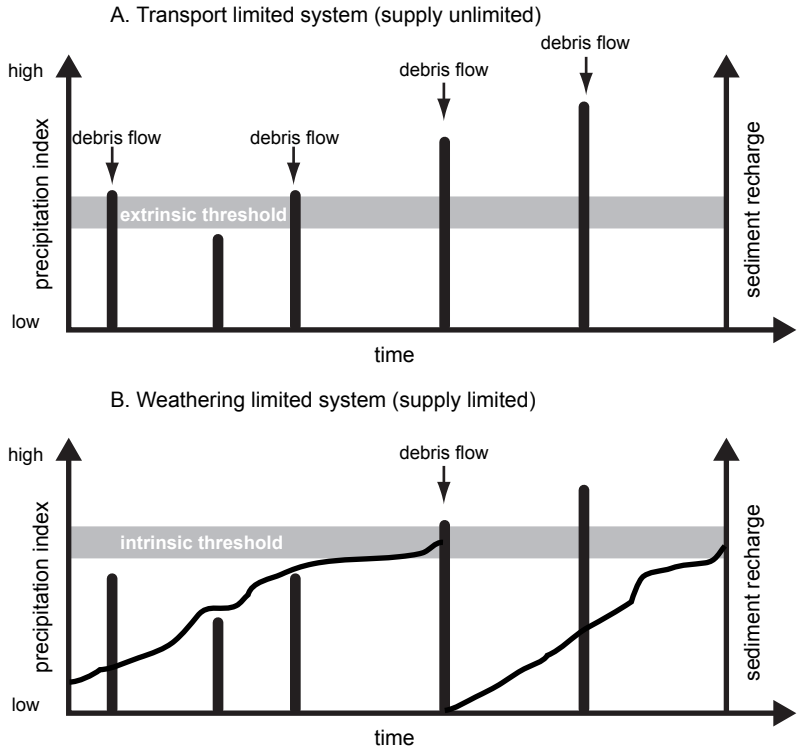


Figure 1-17
Concepts d'occurence des laves torrentielles en fonction du dépassement d'un seuil extrinsèque hydrométéorologique (A) ou d'un seuil intrinsèque géomorphologique (B). Les barres indiquent les événements hydrométéorologiques et la courbe représente la recharge sédimentaire (d'après Bovis et Jakob, 1999)

Le premier type, *transport-limited system* (*supply unlimited*), indique que le transport solide est lié au dépassement d'un seuil extrinsèque hydrométéorologique. Il est directement lié aux événements hydrométéorologiques les plus forts qui commandent la production du transport torrentiel. Deux points caractérisent ce système : d'une part la bonne corrélation entre les transports solides torrentiels et les événements hydrométéorologiques, et d'autre part, un transport de matériaux plus fréquent mais de moindre intensité. Ainsi, comme le montre la **figure 1-17 (A)**, des laves torrentielles plus nombreuses surviennent. Entrent par exemple dans ce type, les bassins ayant hérité de dépôts glaciaires épais, ou encore les bassins situés sur les flancs de volcans actifs apportant en permanence de nouveaux matériaux. Dans ce dernier cas, les premiers résultats des travaux menés par Lavigne et Suwa [2004] en Indonésie montrent une bonne corrélation entre les pluies, classées par types, et les événements de transport solide. A la fin du Petit Age Glaciaire, au XVIII^{e} et au XIX^{e} siècle, de nombreux torrents alpins se trouvaient également dans cette catégorie, comme par exemple le torrent de la Griaz sous le glacier de Tête Rousse sur la commune des Houches (Haute-Savoie) [Peiry, 1988]. C'est certainement ce qui explique la recrudescence des événements torrentiels et le démarrage d'importants travaux d'aménagements des torrents par le service de la RTM en France à cette époque. Par la suite, un grand nombre de ces torrents, comme celui de la Griaz, est passé du premier type au second. Il est intéressant de remarquer ce passage possible d'un type à l'autre au cours du temps.

Pour le second type, weathering limited system (supply limited), où le transport solide est lié au dépassement d'un seuil intrinsèque géomorphologique qui dépend directement de l'état d'encombrement du chenal par des matériaux mobilisables, il faut qu'il y ait coïncidence entre le degré de remplissage du chenal et une forte pluie pour qu'un événement de transport se déclenche (**Cf. Fig. 1-17 B**). Ce type de bassin versant torrentiel est assez fréquent dans les Alpes et c'est uniquement sur celui-ci que porte notre étude. Le schéma conceptuel de la **figure 1-16** sur la limite de stabilité du système, s'applique bien à ce second type, et il constitue donc une hypothèse forte sur laquelle se fonde le travail de recherche présenté ici. Les exemples de torrents sont nombreux dans les Alpes du nord, où les phases de crise morphodynamiques coïncident avec des périodes où la fourniture sédimentaire est particulièrement intense, entraînant un fort encombrement des lits torrentiels, plutôt qu'avec la succession d'événements météorologiques de forte intensité [Lahousse et Salvador, 1999 ; Laugier et Cojean, 2001 ; Peiry, 1988 ; Thouret *et al*., 1995 ; Veyrat-Charvillon, 2000] ; il en est de même pour les autres régions montagneuses du monde comme par exemple en Italie [Turconi et Tropeano, 1999], en Suisse [Rickenmann, 1997], au Canada [British Colombia, 1997 ; Fannin et Wise, 2001 ; Hungr *et al*., 1984], aux Etats-Unis [Cannon *et al*., 2003 ; Cenderelli et Kite, 1998], en Chine [Davies *et al*., 1992 ; Jian *et al*., 1983], au Japon [Marutani *et al*., 2001] ou en Nouvelle-Zélande [Davies *et al*., 1992 ; Marutani *et al*., 2001]. Malgré tout, à l'heure actuelle, la difficulté réside dans la traduction quantitative de ce seuil intrinsèque du système torrentiel [Peiry, 1990 ; Zimmermann *et al*., 1997].

Ce travail de recherche est donc fondé sur des concepts géomorphologiques, en mettant l'accent sur l'instabilité brutale du système qui est matérialisée par d'importants transports solides lors des crues, caractéristique du fonctionnement torrentiel. Cependant, le domaine de validité de notre travail est uniquement constitué des torrents où le transport solide est lié au dépassement d'un seuil intrinsèque géomorphologique dépendant directement du degré de remplissage sédimentaire du chenal, second type que nous venons de présenter [Bovis et Jakob, 1999].

3. Avancées et limites de la modélisation du transport solide torrentiel

L'objectif principal de ce travail est de prédire les volumes de matériaux transportés par les bassins versants torrentiels dans le cadre d'une problématique de protection contre les risques naturels. Après avoir présenté les torrents et leurs crues, puis exposé les concepts géomorphologiques du fonctionnement des systèmes torrentiels, nous allons maintenant aborder un état de l'art des outils actuellement disponibles pour les gestionnaires en charge des risques torrentiels.

3.1. Outils de modélisation disponibles en ingénierie torrentielle

3.1.1. Modélisation des transports solides par charriage

Lorsque le charriage est le mode de transport unique des sédiments lors de la crue torrentielle, des formules hydrauliques permettent le calcul de la capacité maximale de transport. Pour l'utilisation de ces modèles, la connaissance des flux entrants, du débit liquide et du débit solide, est essentielle. L'hydrogramme de crue étant très rarement mesuré directement, il est généralement estimé par calcul à partir des données pluviométriques. Ce constat permet de mettre le doigt sur un problème de données météorologiques récurrent en zone de montagne sur lequel nous reviendrons ; ces données sont rarement disponibles au niveau du site d'étude et souvent ne sont pas non plus de très bonne qualité à cause de la localisation spatiale des orages par exemple.

Concernant les matières solides, l'application des formules suppose que les matériaux soient présents en excès dans les chenaux, afin d'atteindre systématiquement la capacité maximale de transport. Lorsque cela n'est pas le cas, les formules peuvent être utilisées dans des modélisations spatialisées, tel que SHETRAN ou ETC [Brochot et Meunier, 1996 ; Luckey *et al*., 2000 ; Wicks et Bathurst, 1996], où le bassin versant est alors découpé en sous bassins et le chenal en tronçons.

Malgré ces difficultés, ce type de modélisation semble être satisfaisant pour esquisser des scénarios de crue et est assez fréquemment utilisé par les praticiens.

3.1.2. Modélisation des laves torrentielles

Les laves torrentielles, qui sont généralement plus constituées de matières solides que d'eau, ne peuvent pas être modélisées par des formules hydrauliques, bien que certains auteurs aient proposé une adaptation de ces formules qui consiste simplement à leur appliquer un coefficient multiplicateur plus ou moins empirique. Pourtant, c'est ce type de processus de transport qui peut déposer en masse la plus grande quantité de matériaux et donc générer les plus gros risques torrentiels.

Actuellement, différentes voies de recherche sont explorées pour modéliser les transports solides par lave torrentielle, afin de proposer un outil d'aide à la gestion des risques torrentiels :

- la connaissance de la rhéologie et de la mécanique des matériaux,
- des modélisations numériques d'écoulements et de dépôts et des expériences analogiques sur des rampes expérimentales,
- des modèles globaux à l'échelle du bassin versant.

Dans le domaine de la rhéologie et de la mécanique des matériaux, bien que de nombreuses recherches se poursuivent [Ancey, 1999 ; Coussot et Meunier, 1995 ; Iverson, 1997], aucun outil pratique n'est actuellement disponible pour cette utilisation.

De même, les expérimentations en canal ou la modélisation numérique de l'écoulement et du dépôt des laves torrentielles [Laigle, 1998 ; Major, 1997 ; Shieh et Tsai, 1997] qui pourrait être fonctionnelle ne disposent quasiment jamais des conditions aux limites amont, c'est-à-dire que l'on ne connaît ni les apports liquides des précipitations par ruissellement, ni les apports solides des versants et du bassin de réception. Ce type de modèle ne peut presque jamais être calé et reste donc inutilisable.

En somme, des méthodes et formules globales ont été développées dans diverses régions montagneuses pour fournir des outils de prédiction facilement et rapidement disponibles. Le terme global se réfère à l'échelle du bassin versant, toutefois ces méthodes ne suivent pas une approche systémique. Il s'agit de relations statistiques et empiriques entre le volume de sédiments déposé par des événements torrentiels et des paramètres caractérisant les bassins versants. Actuellement ces modèles sommaires constituent les seuls outils disponibles, même si, comme nous allons le voir, leur utilisation ne semble pas, pour les gestionnaires de l'aléa torrentiel, être vraiment satisfaisante.

3.2. Présentation des approches globales

3.2.1. Caractéristiques générales

Dans un article récent, Brochot *et al*. [2002] ont présenté un grand nombre des méthodes globales actuellement disponibles dans un but de synthèse des méthodes utilisables dans les Alpes françaises. La caractéristique commune de ces modèles est leur caractère régional, puisqu'ils sont empiriques et s'appuient sur le traitement statistique de données présentant des particularités régionales. C'est là une première limite : en toute rigueur, le modèle est attaché à une région d'application ; dans la pratique il est souvent utilisé pour d'autres régions montagneuses, faute de modèles disponibles.

Au-delà de cette caractéristique, les formules empiriques s'appuient sur trois autres groupes de caractérisation :

- Les caractéristiques du bassin versant : paramètres globaux de la **figure 1-16** tels que la surface du bassin versant, la pente moyenne, la pente du cône de déjection, la longueur du chenal, etc, qui sont intégrateurs de l'évolution du torrent et ne varient qu'à des échelles de temps longues ;

- La distinction simplifiée entre les différentes catégories de transport solide torrentiel (charriage, mixte, lave) ;
- La détermination des volumes d'événements connus, exprimés par des amplitudes variables (volumes maxima, extrême, moyen, centennal, décennal, etc.).

3.2.2. Formules globales

Ces formules ont évolué au cours du temps, le point commun restant la détermination du volume de sédiments apporté par les événements torrentiels. Sans être exhaustif, le **tableau 1-8** en présente un certain nombre. Il s'agit de formules développées en Autriche [Hampel, 1977], au Canada [Hungr *et al*., 1984 ; VanDine, 1985], en Suisse [Rickenmann, 1997 ; Rickenmann et Zimmermann, 1993 ; VWHG-ETH Zürich, 1988 ; Zeller, 1976], en Italie [D'Agostino, 1996 ; D'Agostino *et al*., 1996 ; Marchi et Trecca, 1996], au Japon [PWRI, 1984 ; Takei, 1984], et en France [Brochot *et al*., 2000b]. Dans le cadre de la gestion des risques, la plupart des ces formules tentent de prédire un volume maximum exprimé de différentes manières : volumes maxima, volume extrême, volume catastrophique, ou encore volume centennal pour la formule française [Brochot *et al*., 2000b]. La formule japonaise de Takei [1984] s'intéresse à des volumes moyens, mais l'équation intègre un coefficient correctif, c, pour estimer les volumes de laves torrentielles de faible fréquence.

Tableau 1-8
Modèles globaux de prédiction des volumes transportés par les crues des torrents (d'après Machi, 1999, modif.)

Formula	Region / country	Source
$V_a = 150\ A_d\ (Sf-3)^{2.3}$	Austria	(Hampel, 1977)
$V_a = c\ 13{,}600\ A_d^{0.61}$	Japan	(Takei, 1984)
$V = K\ A_d\ I_c$	Austria	(Kronfellner-Kraus, 1985)
$V = 10{,}000\ A_d$	British Colombia (Canada)	(Van Dine, 1985)
$V = L_c\ (110 – 2.50\ S_f)$	Switzerland	(Rickenmann and Zimmermann, 1993)
$V = L_c\ (6.4\ S_f – 23)$ $7\% < S_f < 15\%$	Switzerland	(Rickenmann, 1997)
$V = L_c\ (110 – 2.50\ S_f)$ $15\% < S_f < 40\%$		
$V_a = 39\ A_d\ S_f^{1.5}\ IG$	Trentino (Italy)	(D'Agostino et al., 1996)
$V_a = 29{,}100\ A_d^{0.67}$	Trentino (Italy)	(D'Agostino, 1996)
$V = 70{,}000\ A_d$	Northeastern Italy	(Marchi and Trecca, 1996)
$V=755{,}1\ Ad^{-0{,}218}$	Switzerland	(VWHG-ETH Zürich, 1988)
$V=1100\ o\ R_{24}\ Ad$	Japan	(PWRI, 1984)
$V_{100}=0.49\ A_d\ I_b^{1.6}\ IG\ (SNV+2)^{0.2}$	Maurienne Valley (France)	(Brochot et al., 2000)
$V=(L_1\ e_1)+...+(L_i\ e_i)$	British Colombia (Canada)	(Hungr et al., 1984)
Magnitude-frequency envelopes	Alps, Tatra Mountains, Scotland, Norway, Swedish Lapland	(Van Steijn, 1996)

V, maximum debris flow volume (m^3)
V_a, average debris flow volume (m^3)
V_{100}, volume occuring every 100 years
A_d, drainage basin area (km^2)
S_f, fan slope (%)
c, parameter depending on the probability of exeedance
L_c, channel length (m)
I_c, average channel slope (%)
I_b, elevation relief
IG, geologic index
K, torrentiality factor
o, runoff coefficient fonction of drainage basin area
R_{24}, cumulated rain during 24 hours by the event
L_i, length of homogeneous reach
e_i, sediment yield rate of the channel (m^3/m)
SNV, Soil area with no vegetation

Les principaux paramètres communs sont des caractéristiques générales du bassin versant : la surface du bassin versant pour quasiment toutes les formules et la pente du cône de déjection, la longueur du chenal, la pente moyenne du chenal ou la dénivelée totale du bassin.

Par la suite, certains auteurs ont tenté d'introduire des variables supplémentaires rendant compte des précipitations ou de la fourniture sédimentaire pour affiner les résultats. Ainsi, le Japon [PWRI, 1984] a intégré un coefficient de ruissellement du bassin versant, o, ainsi que le cumul de précipitations des 24 heures précédant l'événement, R_{24}. La prise en compte de la production sédimentaire du bassin versant a d'abord été tentée en Autriche [Kronfellner-Kraus, 1985 ; Kronfellner-Kraus, 1986]. Elle est exprimée par un facteur de torrentialité, K, qui dépend de la taille du bassin versant et de deux paramètres régionaux. Elle a ensuite été testée en Italie [D'Agostino, 1996] puis en France [Brochot *et al*., 2000b] à travers un indice géologique. Plus récemment, des auteurs canadiens [Fannin et Rollerson, 1993 ; Hungr *et al*., 1984 ; Jakob, 1996] ont proposé la prise en compte d'un taux de production sédimentaire des berges du chenal (exprimé en m^3/m linéaire de chenal) calculé en divisant le volume total de l'événement par la longueur de chenal parcouru par la crue. Ainsi, pour des torrents de Colombie Britannique, Hungr *et al*. [1984] ont déterminé une typologie des lits et indiqué les apports sédimentaires des berges leur correspondant (**Cf. Tab. 1-9**). Les travaux de Bovis et Jakob [1999] sont particulièrement intéressants puisqu'ils mettent en évidence, par une modélisation bivariée sur des torrents canadiens, l'importance de variables tenant compte de la production sédimentaire. Les formules qu'ils utilisent sont présentées dans le **tableau 1-10** ; pour plus de précision, ils ont élaboré une formule pour l'ensemble des torrents étudiés et deux autres qui séparent les torrents en fonction des types déjà décrits à la **figure 1-17**.

Tableau 1-9
Apports sédimentaires de différents types de biefs torrentiels (d'après Hungr et al., 1984, modif.)

Channel type	Bed material	Side slopes	Stability conditions	Channel debris yield rate (m^3/m)
A	Bedrock	Non erodible	Stable, practically bare of soil cover	0-5
B	Thin debris or loose soil over bedrock	Non erodible (bedrock)	Stable	5-10
C	Deep talus or moraine	Less than 5m high	Stable	10-15
D	Deep talus or moraine	Talus over 5m high	Side slopes at repose	15-30
E	Deep talus or moraine	Talus over 20m high	Side slopes potentially unstable (landslide areas)	Up to 200 (consider as point source)

A l'image des relations connues en hydrologie entre fréquence et débit des crues, des relations entre fréquences et volumes de laves torrentielles ont été étudiées [Johnson *et al*., 1990 ; Van Steijn, 1996]. Brochot *et al*. [2002] proposent également une méthode directement inspirée d'études statistiques sur des échantillons de variables hydrologiques, mais appliquée à des données historiques d'événements torrentiels, qui fournit un volume en fonction d'une fréquence de temps de retour (volume centennal, décennal, etc.).

Enfin, des tentatives de quantifications sur les bases d'expertises géomorphologiques ont été mises en œuvre. Elles utilisent souvent une connaissance d'expert afin de délimiter les zones potentielles de

Tableau 1-10
Modèles sous forme de régressions permettant de calculer le volume moyen de la lave torentielle (M), le débit maximum (Q_{max}), la fréquence moyenne (f), et un indice d'activité (I_A) pour différents types de torrents canadiens de Colombie Britannique (d'après Bovis et Jacob, 1999)*

Regression equations	R^2	R^{2*}	F ratio	Signif.	Mean $\frac{\text{Pred.}}{\text{Obs}}$
Unstratified sample (n=33)					
$M^* = 800.Z_T^{2,38}.A_I^{1,15}$	0,73	0,72	41,0	0,001	0,99
$Q_{max} = 40.Z_T^{2,55}.A_I^{0,35}$	0,70	0,69	34,5	0,001	1,10
$I_A = 190.Z_T^{2,28}.A_I^{1,20}$	0,59	0,58	21,8	0,001	0,91
f No usable relation	<0,40				
Weathering-limited sample (n=21)					
$\text{Log } M^* = 0,48 + 2,00.Z_T + 0,10.A_{\%}$	0,75	0,74	29,0	0,001	1,00
$\text{Log } Q_{max} = -0,77 + 1,66.Z_T + 0,30.A_{\%}$	0,75	0,74	27,4	0,001	1,10
$I_A = 850.Z_T^{3,30}.A_I^{0,07}$	0,51	0,48	9,3	0,005	1,09
f No usable relation	<0,40				
Transported-limited sample (n=12)					
$M^* = 420.A_I^{0,82}.N_S^{2,55}$	0,91	0,90	46,7	0,001	1,08
$Q_{max} = 40.A_I^{0,72}.N_S^{0,40}$	0,76	0,74	14,0	0,001	1,10
$I_A = 300.R_0^{2,95}.Z_R^{-2,75}$	0,80	0,78	18,4	0,001	1,10
$f = 0,01.R_0^{1,06}.Z_R^{-3,50}$	0,76	0,74	14,6	0,005	1,10

R^2 is the coefficient of determination. R^{2*} is the adjusted coefficient of determination, compute from: $R^{2*} = 1 - (1-R^2)\ (n-1) / (n-p)$, where n is sample size and p is number of model parameters.

Z_T, Total basin relief (km); $Z_T = z_{max} - z_{min}$
A_I, Active area index; $A_I = A_C \times N_S$ with A_C, area actively contributing debris
$A_{\%}$, Percentage area actively contributing debris; $A_{\%} = A_C / A_T \times 100$
N_S, Weighted stability number
R_0, Zero-order ruggedness
Z_R, Elevation relief ratio; $Z_R = (z - z_{min}) / (z_{max} - z_{min})$

fourniture sédimentaire. Dans une étude sur un bassin versant de la vallée de la Tarentaise, différents scénarios d'événements torrentiels ont ainsi été proposés [Thouret *et al*., 1995]. Par ailleurs, Bonnet-Staub [1998] indique des estimations de transport solide pour des torrents de la vallée de la Maurienne, suite à un travail de cartographie géomorphologique. La limite de ce type d'approche réside dans le fait qu'elle est soumise à la qualité de l'expertise et ne peut donc pas être confié à tout le monde. La méthode géomorphologique la plus aboutie est proposée par le groupe de travail pour l'hydrologie opérationnelle suisse [Lehmann *et al*., 1996 ; Spreafico *et al*., 1996] ; elle présente d'ailleurs de nombreuses similitudes avec notre travail. La production sédimentaire d'un événement torrentiel extrême est basée sur les processus de transport (charriage ou lave torrentielle), le potentiel de sédiments disponibles en fonction des zones sources, et les dépôts dans le chenal torrentiel [Lehmann, 1999]. Les calculs étant basés sur la capacité de transport des matériaux, cette méthode est plus adaptée aux processus de charriages qu'aux laves torrentielles, rejoignant ainsi les modélisations spatialisées déjà évoquées, telles que SHETRAN ou ETC [Brochot et Meunier, 1996 ; Luckey *et al*., 2000 ; Wicks et Bathurst, 1996].

3.3. Comparaison et analyse des formules globales

A titre de test, la plupart des formules globales dont il a été question ci-dessus ont été appliquées pour comparaison au torrent du Poucet, dans la vallée de la Maurienne [Laigle et Marchi, 2000 ; Marchi, 1999]. Cette étude comparative est d'un grand intérêt car elle pose une question cruciale pour l'ingénierie torrentielle : quelle est la meilleure formule à utiliser, si tant est que cette démarche de globalisation soit valable ? Les résultats de cette analyse sont très disparates puisque, selon les formules, ils varient d'un

facteur un à dix, allant de 40 000 m^3 à 500 000 m^3. Cette variabilité extrême conduit à se demander si ces formules ont finalement un sens.

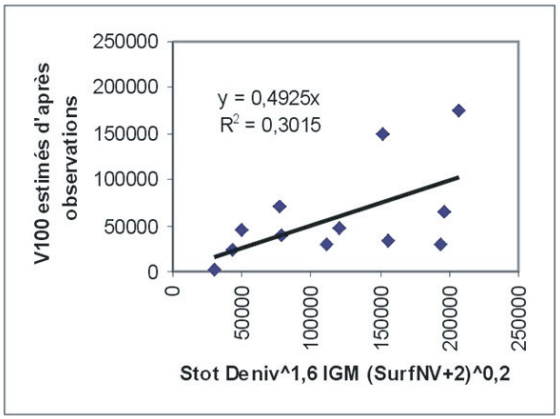
Ces études comparatives montrent clairement que la précision actuelle des résultats quantitatifs sur l'estimation des volumes de sédiments produits par les bassins versants torrentiels est nettement insuffisante, et qu'il existe un déficit d'outils pour une utilisation par les gestionnaires, confrontés aux risques torrentiels. Actuellement, l'utilisation de la connaissance experte du terrain et du fonctionnement des différents processus de transport solide, ainsi que la mémoire des événements passés, s'avère être la solution la plus efficace. Il est donc nécessaire, dans un premier temps, d'analyser et d'expliquer quelles sont les limites de ces modèles globaux.

3.4. Limites des modèles globaux

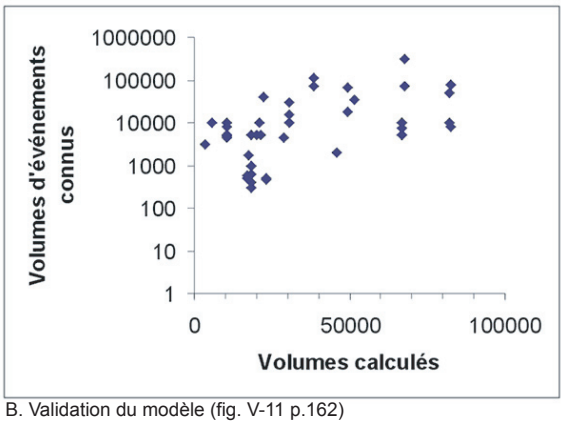
3.4.1. Une utilisation régionale

L'approche empirique qui est à la base de la création des formules globales, implique normalement l'application de chacun des modèles à une seule et unique région. Dans la pratique, les utilisateurs extrapolent souvent l'utilisation d'une formule à une autre région en considérant que deux régions aux caractéristiques identiques sont équivalentes, en particulier concernant le climat et la lithologie.

La logique voudrait donc que l'on utilise en France la formule développée par Brochot [2000b], en particulier pour les torrents de la vallée de la Maurienne. Pourtant, il est important de mettre en garde les utilisateurs vis-à-vis de cette formule, en particuliers les agents du service de la RTM qui s'appuient légitimement sur les travaux du Cemagref, centre de recherche de référence pour les forestiers français. Malheureusement son élaboration est sujette à d'importantes critiques : d'un point de vue statistique, la relation proposée sur seulement 12 individus ne présente pas une bonne corrélation (R^2 = 0,3) entre les variables choisies et l'estimation du volume réel des événements torrentiels ; de même la validation sur 22 autres torrents montre un nuage de points très étalé malgré l'utilisation d'une échelle semi-logarithmique (**Cf. Fig. 1-18**). Cette formule n'est donc pas statistiquement significative. La recherche d'un volume centennal est également contestable, même si cette notion en référence à l'hydrologie est bien connue des praticiens. Si l'on se réfère à nouveau aux deux grands groupes de torrents décrits par la **figure 1-17**, cette notion peut se concevoir pour les torrents du premier groupe dont le déclenchement des événements torrentiels est lié à un phénomène pouvant être considéré comme aléatoire (l'occurrence des précipitations) ; ainsi même le lendemain d'une crue centennale, la probabilité d'occurrence annuelle d'une telle crue reste d'une chance sur cent. Pour les torrents du second groupe, cette approche probabiliste est aberrante puisque le déclenchement des événements torrentiels est alors dépendant de la recharge sédimentaire ; il faudra donc attendre un certain temps avant que les matériaux provenant de l'amont soient à nouveau disponibles dans le chenal pour qu'une nouvelle lave torrentielle puisse survenir.



A. Calage du modèle (fig. V-10 p.161)



B. Validation du modèle (fig. V-11 p.162)

Figure 1-18
Le seul modèle global élaboré en France (Alpes du Nord) ne présente pas de relation statistique significative avec la réalité (Brochot et al., 2000b)

3.4.2. Les problèmes de qualité des données

La qualité des données est primordiale, en particulier dans le cas d'études statistiques, or c'est certainement un des problèmes majeurs de toute étude sur les risques torrentiels.

En effet, les crues torrentielles, comme nous l'avons mentionné plus haut, sont des phénomènes soudains, peu prévisibles, d'intensités très variables ce qui rend difficile un recensement exhaustif des événements. Très souvent, les événements de faible amplitude et plus fréquents sont ainsi occultés des séries, ou pire ils ne sont recensés qu'à certaines époques (années récentes, par exemple).

S'ajoute à cela un facteur essentiel pouvant perturber fortement ces séries : la rigueur avec laquelle sont conduits le recensement et l'archivage des données. Trois points essentiels déterminent la qualité des séries de données :

- la continuité et l'homogénéité du recensement ;
- la qualité des données elles-mêmes (précision tant qualitative ou descriptive que quantitative) ;
- la qualité et la pérennité de l'archivage qui permet la transmission jusqu'à nos jours.

Dans ce domaine, le premier constat est que la mémoire humaine est assez peu fiable. C'est dans la nature humaine de modifier, volontairement ou non, les informations sur les événements catastrophiques.

En fonction de la sensibilité des populations, la mémoire peut s'estomper au cours du temps, ou au contraire s'exacerber démesurément à cause du caractère exceptionnellement rare du phénomène. Ainsi, les informations données en toute bonne foi sur le moment exact d'une crue ou sur son amplitude (hauteur, volume,…) ne sont pas toujours précises ou même justes ; leur utilisation dans des études statistiques risque de fausser les résultats. Dans les archives, de nombreux événements torrentiels ont été répertoriés à l'occasion de déclarations de sinistres mais les informations concernant les dégâts et les volumes de matériaux sont souvent surestimées pour obtenir des indemnités maximales et peuvent donc biaiser les résultats statistiques lorsque l'on prend en compte ces données. Les témoignages dépendent donc aussi des contextes économiques et sociaux.

Le second constat est que l'on trouve souvent des lacunes dans les séries de données ce qui est très préjudiciable à une étude statistique de qualité, en particulier lorsqu'elle traite d'événements extrêmes donc peu fréquents. La cause peut tout simplement être la destruction, à un moment donné, d'une partie de la base de données par le feu ou une inondation. Les grands événements historiques, comme les guerres, sont parfois la cause d'une destruction directe des données ; ils peuvent aussi avoir une action moins directe en détournant l'intérêt et la vigilance des personnes qui élaborent cette base de données, l'importance des événements naturels étant alors reléguée au second plan.

Plus concrètement, par exemple, cela se traduit pour le Manival par une absence d'événements torrentiels recensés entre 1914 et 1953. Ce torrent a pourtant fait l'objet depuis la fin du XIX^{ème} siècle d'un suivi régulier et sérieux de la part des agents de la RTM (Restauration des Terrains de Montagne), ainsi que de recherches approfondies au niveau de différentes sources d'archives par des historiens [Brochot *et al*., 2000a ; Lang *et al*., 2003]. Pour les experts connaissant ce torrent, il parait peu probable qu'il ait pu connaître une accalmie de son activité torrentielle aussi longue, et comme nous venons de le voir, les causes peuvent être diverses et variées (aménagements importants du service de la RTM, changements morphoclimatiques, activité de prospection des agents de terrain moindre durant l'entre deux guerres, ou encore un incendie qui aurait détruit une partie des archives).

3.4.3. Les variations de l'activité torrentielle dans le temps

L'activité torrentielle connaît des variations importantes soit pour des raisons climatiques, soit pour des raisons d'aménagement anthropique. Un exemple d'évolution climatique assez récent est la période du Petit Age Glaciaire (PAG) qui a vraisemblablement pris fin vers 1850 mais a influencé l'activité torrentielle jusqu'en 1890 et peut-être même beaucoup plus tard [Ballandras, 1997 ; Bravard, 1989 ; Desplanches, 1999 ; Grove, 1972 ; Grove, 1987 ; Magny, 1995 ; Miramont et Guilbert, 1997 ; Van Steijn, 1996]. Quant à l'évolution anthropique de l'occupation du sol, les déforestations ou les changements d'activité suite à l'exode rural, modifient fortement l'activité érosive [Liébaut, 2003].

Les modèles utilisant les mêmes outils statistiques de prédiction que ceux utilisés en hydrologie pour les crues de rivière, ont besoin de séries de données sur une longue période de temps car les événements extrêmes sont peu fréquents. Les résultats ont donc de grandes chances d'être faussés par les éventuelles modifications dans le temps de l'activité torrentielle. Les séries portant sur les torrents ne sont généralement pas stationnaires, et cette non-stationnarité est difficilement mise en évidence par des outils statistiques à cause du petit nombre de données utilisées. Elle semble pourtant évidente.

3.4.4. Le choix des données en fonction des échelles spatiales et temporelles étudiées

De nombreux modèles globaux se heurtent à un problème d'échelle dans l'utilisation des données. Du point de vue statistique, les individus étudiés sont des objets géographiques de dimension réduite (quelques hectares à quelques dizaines d'hectares). Mais par manque de données disponibles à cette échelle, l'utilisation de cartes régionales (géologie, couverture végétale,…) est fréquente. L'échelle de ces documents diffère bien souvent trop de la taille des individus étudiés pour que cela n'ait pas une incidence sur le résultat de la modélisation. Il convient donc d'être très rigoureux dans la phase d'acquisition des données et de mettre en œuvre une base de donnée qui soit cohérente avec l'échelle des bassins versants étudiés.

L'analyse de ces modèles a montré que, dans un souci de simplification, le bassin versant est généralement considéré comme une "boite noire". C'est d'ailleurs le reflet de nombreuses études géomorphologiques sur les torrents qui ont pour objet soit la production détritique des versants, soit la fourniture sédimentaire en sortie de bassin versant, mais plus rarement le fonctionnement général au sein du bassin versant. Dans l'ensemble, les paramètres utilisés sont alors très généraux, comme la taille du bassin versant ou sa pente moyenne, et ne reflètent pas l'évolution rapide qui peut exister à l'intérieur du bassin versant, liée aux conditions hydroclimatiques ou aux variations de charge sédimentaire. Pour les bassins versants torrentiels que nous étudions (ceux du second groupe de la **figure 1-17**), le schéma conceptuel de la **figure 1-16** nous a permis de comprendre que le caractère soudain des crues torrentielles était lié en partie aux conditions hydrométéorologiques (précipitations) mais dépendait surtout de la recharge du chenal en sédiments disponibles pour le transport solide (charge sédimentaire disponible pour le transport). Or les modèles globaux existants utilisent essentiellement des "facteurs de prédispositions permanents" (caractéristiques physiques du bassin versant) qui ne peuvent à eux seuls rendre compte du fonctionnement du système torrentiel. Au-delà de quelques décennies, ces facteurs représentent des valeurs moyennes sur des périodes de temps historiques ou géologiques qui atténuent les variations rapides et fréquentes de l'activité torrentielle. Ces échelles d'étude, bien que riches d'enseignements, ne permettent pas une bonne estimation du transport solide des crues actuelles et ne sont donc pas adaptées à la gestion des risques naturels.

4. Proposition d'une nouvelle voie de recherche

4.1. Enseignements tirés de la modélisation conceptuelle et hypothèses de travail

L'approche globale à l'échelle de l'ensemble du bassin versant est nécessaire pour fournir des estimations rapides des volumes sédimentaires mobilisés lors des crues torrentielles, ainsi que pour compléter des outils et modèles de prédictions plus fins, mais pas encore très opérationnels. Mais il semble que l'approche globale basée sur des études statistiques et empiriques, largement répandue, atteint actuellement ses limites. Difficilement généralisable, elle ne permet pas d'être un outil sûr de prédiction. Il manque à cette approche la prise en compte du fonctionnement global du bassin versant, source de brusques changements générateurs de crues.

La modélisation conceptuelle (**Cf. Fig. 1-16**) nous a montré que la dynamique des apports sédimentaires pouvait être l'élément prépondérant dans le fonctionnement du transport solide torrentiel, particulièrement pour les torrents des Alpes du nord.

Une fois les matériaux détritiques préparés par la météorisation, leur parcours au sein du bassin versant torrentiel peut être séparés en deux types de processus de transport :

- les processus géomorphologiques de versant, qui fonctionnent chacun à leur rythme et se relaient dans le transport des matériaux jusqu'au chenal ;
- le transport par la crue à l'exutoire du bassin (lave torrentielle et/ou charriage).

La plupart du temps, le transport des sédiments dans leur cheminement vers l'aval s'effectue par à coups, laissant les matériaux piégés, pour un temps indéterminé, dans des zones caractéristiques. Dans les versants, ces zones sont nombreuses mais généralement de faible capacité de stockage, à l'occasion de dépressions ou de piégeage par la végétation par exemple. A l'inverse la plus forte capacité de stockage se trouve sur le cône de déjection. Le chenal constitue alors une zone clé car il représente un espace de stockage important pour la charge solide fournie par l'ensemble des processus de versant.

Le travail de cette thèse porte essentiellement sur la capacité de stockage du chenal en sédiments détritiques ; peu importe avec quel rythme ou fréquence ceux-ci s'y sont accumulés et quel(s) processus de versant est à l'origine de leur accumulation. C'est cette capacité de stockage et l'état d'encombrement du chenal à un moment donné qui va conditionner l'équilibre intrinsèque du tronçon de lit considéré et qui va influer sur l'aptitude du système torrentiel à produire un événement conduisant à un transfert de charge important vers l'aval.

4.2. Objectifs poursuivis

L'objectif affiché de ce travail de recherche est de proposer une méthode ou un modèle, outil pour les gestionnaires des risques torrentiels, qui leur permette de prédire les volumes de matériaux apportés par une crue torrentielle.

Afin de ne plus considérer le bassin versant comme une boite noire, la dynamique sédimentaire au sein même du système torrentiel doit être étudiée pour comprendre le rôle complexe joué par les mécanismes d'érosion et de dépôt le long des chenaux. En s'appuyant sur la compréhension du fonctionnement torrentiel, pas seulement descriptive mais aussi quantitative, notre but est d'intégrer un nombre restreint d'indicateurs géomorphologiques représentatifs dans la méthode finale proposée. Les techniques de bilan sédimentaire ont été privilégiées en s'intéressant plus particulièrement à l'estimation des volumes de sédiments stockés au sein du chenal et disponibles pour des événements de crue torrentielle. Deux raisons nous ont poussé à privilégier la prise en compte des laves torrentielles par rapport aux transports par charriage, bien que le mode de transport des matériaux lors de la crue ne nous importe que peu, l'important étant le volume de sédiments transportés : d'une part, dans les Alpes françaises ce sont les laves qui apportent le plus de matériaux (en volumes événementiels), faisant les dégâts les plus importants, d'autre part, il existe certains outils applicables aux charriages torrentiels qui semblent donner satisfaction aux gestionnaires, alors qu'il n'y en a pas pour les laves torrentielles.

Pour déterminer le volume de matériaux maximum que peut fournir un bassin versant torrentiel au cours d'un événement (lave torrentielle), deux phases de travail ont été nécessaires :

- Pouvoir calculer le volume potentiellement disponible dans le chenal,
- Etudier les grandes lignes de la dynamique sédimentaire à l'échelle du bassin versant.

La première phase a demandé la mise au point d'une méthode d'échantillonnage, de mesure et de calcul adaptée à la fois aux torrents et aux utilisateurs potentiels. Cette méthode a donc été optimisée pour obtenir le meilleur rapport entre précision des résultats et temps passé à l'acquisition des données. Elle s'appuie sur des outils topographiques : appareils de mesure de terrain ou stéréophotogrammétrie.

La seconde phase a permis d'évaluer la part du volume potentiel réellement utilisable par la lave torrentielle. Le fonctionnement du transport solide a été analysé à partir de différentes données privilégiant les sources les plus fiables :

- les mesures de terrain, telles que les mesures topographiques contemporaines du chenal et d'un ravin en tête de bassin, une cartographie des zones d'apport sédimentaire des versants, des mesures pluviométriques dans le bassin de réception ;
- les mesures sur photographies aériennes, telles que les mesures topographiques permettant d'élaborer des états sédimentaires du chenal de 1963 à nos jours.

Les données historiques concernant les événements et l'entretien du torrent ont également servi, en particulier pour valider certaines analyses par recoupement des informations provenant de sources différentes.

Dans un premier temps, l'étude approfondie du fonctionnement torrentiel sur un seul torrent, le Manival, a permis de développer la méthode d'estimation du volume maximum de lave torrentielle, puis dans un second temps, cette dernière a été testée et appliquée à d'autres torrents du même type.

4.3. Terrain d'étude : le bassin expérimental du Manival

4.3.1. Le choix du bassin versant

Les critères ayant orienté le choix du torrent d'étude sont multiples. Il s'agit de :

- l'activité du transport solide conséquente du bassin versant,
- l'absence de glissements de terrain importants,
- la disponibilité d'informations sur l'histoire du torrent (événements, aménagements),
- la disponibilité de photographies aériennes à différentes dates,
- la proximité de la ville de Grenoble permettant de se rendre rapidement sur le site,
- l'accessibilité et la sécurité du bassin.

A. L'activité torrentielle

L'indicateur le plus spectaculaire de l'activité torrentielle du bassin versant du Manival est sans aucun doute le volume de son cône de déjection qui est l'un des plus importants de France. Même s'il intègre une activité intense moyennée sur une longue période de temps, d'autres sources montrent qu'il conserve de nos jours une activité conséquente. D'après les techniciens du service de la RTM qui s'appuient sur un recensement partiel des événements depuis 1887 [Desplanches, 1999], la périodicité des laves torrentielles sur ce torrent serait de l'ordre d'une tous les trois ans. De plus, une visite de terrain le long du chenal montre que certains tronçons du chenal paraissent subir des variations importantes de leur remplissage sédimentaire, comme s'il existait une "respiration sédimentaire" verticale du chenal.

Même si les processus géomorphologiques de versant sont nombreux, l'absence de glissements de terrain dans le bassin versant du Manival est une de ses particularités. Nous avons vérifié ce point par des expérimentations légères de terrain. L'intérêt de ce travail a été de pouvoir isoler les processus de transport torrentiel. En effet, il arrive dans certains cas qu'un glissement de terrain se mette rapidement en mouvement et, après avoir atteint le chenal, se transforme en lave torrentielle. Le glissement de terrain ayant une dynamique propre assez complexe et des processus d'apport sédimentaire fortement liés à des conditions hydrométéorologiques spécifiques, son absence peut rendre la compréhension de la dynamique sédimentaire du bassin un peu moins complexe.

B. Les données disponibles

Le Manival est sans conteste considéré comme le torrent le mieux connu des Alpes du Nord. Le service de la RTM dispose de nombreuses informations concernant particulièrement les aménagements effectués depuis plus d'un siècle dans le torrent. Parmi les documents détenus citons :

- un état des lieux de tous les ouvrages du torrent avec description, schéma et photographie de chacun d'entre eux à plusieurs dates, débuté en 1980,
- un descriptif de nombreux événements torrentiels (**Cf. Tab. 1-11**),
- des plans, profils en long, profils en travers de certaines zones du torrent à des dates passées,
- une étude géotechnique du bureau d'étude SAGE.

Nous ne retiendrons que les informations postérieures à 1950 correspondant aux quelques décennies relatives à l'échelle de temps de cette étude sur les risques torrentiels. De plus, cette période inclut la lave la plus importante, estimée à l'époque à environ 60 000 m^3. Toutefois, le recensement des événements par le service de la RTM n'est certainement pas exhaustif car les plus petites laves n'ont parfois pas été notées. De plus, fréquemment, des laves de moindre importance ne concernent qu'une portion du chenal et restent confinées dans la partie haute du bassin versant n'étant alors pas toujours observées.

Par ailleurs, le torrent du Manival présente une importante couverture de photographies aériennes (**Cf. Tab. 1-11**). Leur utilisation a été fortement privilégiée car elles représentent une source d'information fiable et objective. Les premières photographies aériennes disponibles datent de 1947, ce qui correspond bien à notre période d'étude, même si la qualité des premières photographies ne permet pas toujours de les exploiter de manière satisfaisante.

C. L'accessibilité

Ce dernier critère est très pragmatique, mais finalement, c'est ce qui rend possible ou non l'étude des transports solides torrentiels.

L'accès relativement aisé au sein du bassin versant grâce aux nombreux chemins ouverts par les agents de la RTM pour les travaux d'aménagements, ainsi qu'une relative sécurité des différents sites de mesures et d'observation vis-à-vis des transports solides (événements torrentiels, chutes de blocs,…) ont été des critères primordiaux auxquels le torrent du Manival répond parfaitement. Le plus haut point d'observation et de mesure dans le bassin de réception est accessible à pied, en seulement une heure de marche soutenue.

La proximité du site par rapport à la ville de Grenoble est un atout non négligeable, car il a permis un suivi régulier sur plusieurs années, en étant assez rapidement sur le terrain à la suite de chaque événement climatique et/ou torrentiel.

Tableau 1-11
Classement chronologique des événements torrentiels (d'après le service de la RTM) et des photographies aériennes disponibles depuis 1950 sur le bassin versant du Manival

Date des photographies aériennes	Date de l'événement torrentiel	Couverture du chenal photos.	Estimation du volume événement	Description de l'événement / Echelle de la photographie
	Automne 1952 ou 1953			Une lave torrentielle coupait la RN 90 ; c'est le dernier épisode en date ayant causé des dommages jusqu'au niveau de la RN
26 février 1963		84%		1/20 000e
	21 mars 1968		60 000 m^3	Une lave torrentielle s'est déposée dans la zone de divagation ; cette lave constitue l'événement de référence mais cet événement comprenait un mélange de lave et d'avalanche de neige de fonte
13 août 1970		100%		1/15 000e
28 oct. 1975		100%		1/30 000e
29 juillet 1981		100%		1/15 000e
18 oct. 1984		100%		1/17 000e
	1984		15 000 m^3	Une lave remplissait la plage de dépôt jusqu'à son entonnement aval
26 oct. 1985		100%		1/10 000e
	16 juin 1986			Une lave a été déclenchée lors d'un orage de grêle
	1987			Il y aurait eu un débordement et un dépôt entre le pont de Tovière et le pont du Moulin
30 août 1987		100%		1/30 000e
	25 mai 1988			Une lave remplit la plage de dépôt
30 août 1989		100%		1/30 000e
	15 fév. 1990			Une crue provoque des affouillements de berges
	26 juin 1990		12 000 m^3	La formation d'une lave qui s'est déposée dans la partie amont de la plage
	30/31 mai 1992		(Faible ?)	Suite à un écroulement de matériaux meubles dans le ravin de la Roche en janvier 1991, une lave torrentielle boueuse venait obstruer les pertuis du barrage filtrant de la plage de dépôt, et ce jusqu'à leur sommet (4 m), ne laissant passer que les matériaux les plus fins qui allaient s'étaler sous forme de boue sur le chenal aval
1er juillet 1993		100%		1/17 000e
	20 juin 1995			Une lave est recensée avec des flottants recueillis dans la plage
22 juillet 1996		100%		1/30 000e
	03 juin 1998		6 000 m^3	Une lave colmate les pertuis de l'ouvrage de la plage et laisse passer de l'eau boueuse sur son déversoir.
16 mars 1998		100%		1/25 000e
1er avril 2000		76%		(vues obliques) 1/3 000e

4.3.2. Les caractéristiques du bassin versant

Situé sur les communes de Saint-Ismier et de Saint-Nazaire-les-Eymes, le Manival est un affluent de rive droite de l'Isère en amont de Grenoble (**Cf. Fig. 1-19**).

A. Morphologie générale

Le bassin versant du Manival entaille profondément la retombée Est du massif de la Chartreuse. D'une orientation générale Sud Sud-Est, il est dominé au Nord par l'impressionnante paroi du Bec Charvet (1738 m. d'altitude) et débouche au Sud dans la vallée du Grésivaudan où il a édifié un vaste cône de déjection.

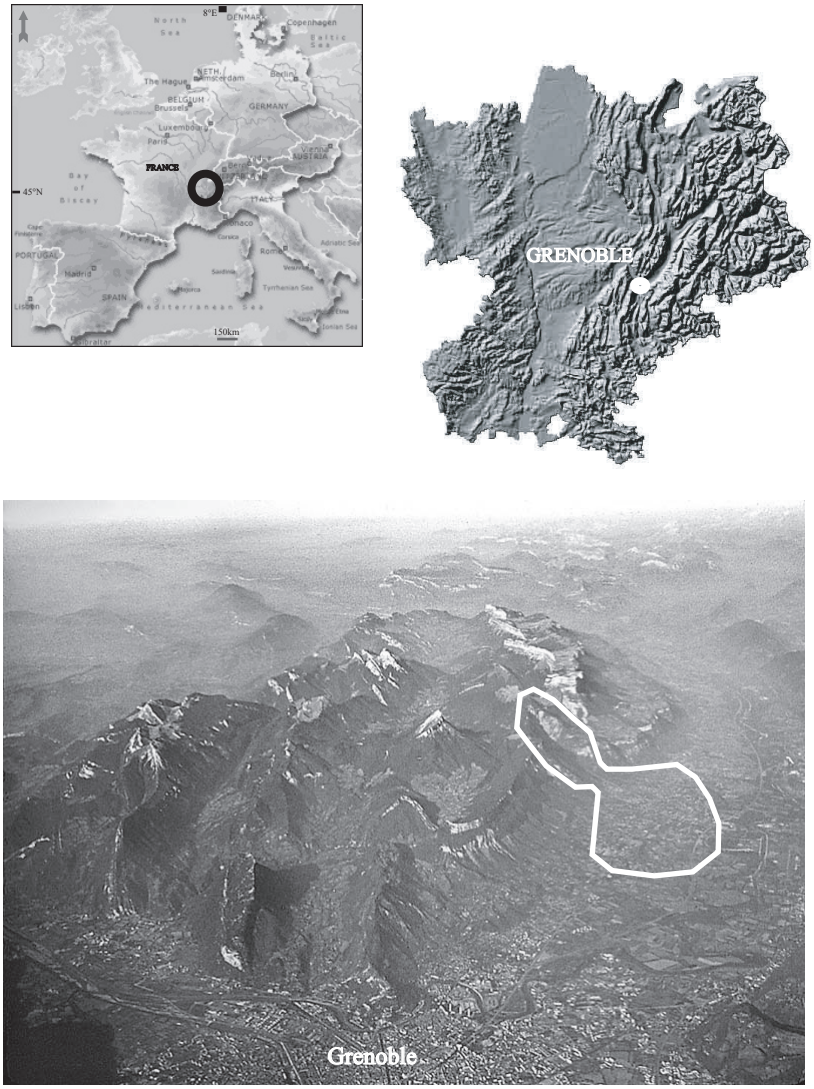


Figure 1-19
Situation du torrent du Manival

Le Manival se jette aujourd'hui dans une chantourne, canal d'assainissement agricole, à proximité de l'Isère (222 m d'altitude). La superficie totale du bassin est d'un peu plus de 7 km^2 ; celle du bassin amont jusqu'à la plage de dépôt est de l'ordre de 3 km^2. La longueur totale du talweg est d'environ 7 kilomètres et sa pente moyenne de 20 %.

Il peut être divisé en trois zones distinctes [Gruffaz, 1997] (**Cf. Fig. 1-20**) :

- le bassin de réception (de 1738 à 860 m. d'altitude) ;
- la zone dite "de divagation" (de 860 à 590 m.), malgré l'endiguement actuel du torrent, correspondant à la partie supérieure du cône ;
- le cône de déjection moyen et inférieur (de 590 à 222 m.).

Dans le bassin de réception, la branche principale draine trois affluents principaux : les ravins de la Roche, de Grosse Pierre et de Genièvre (**Cf. Fig. 1-20**).

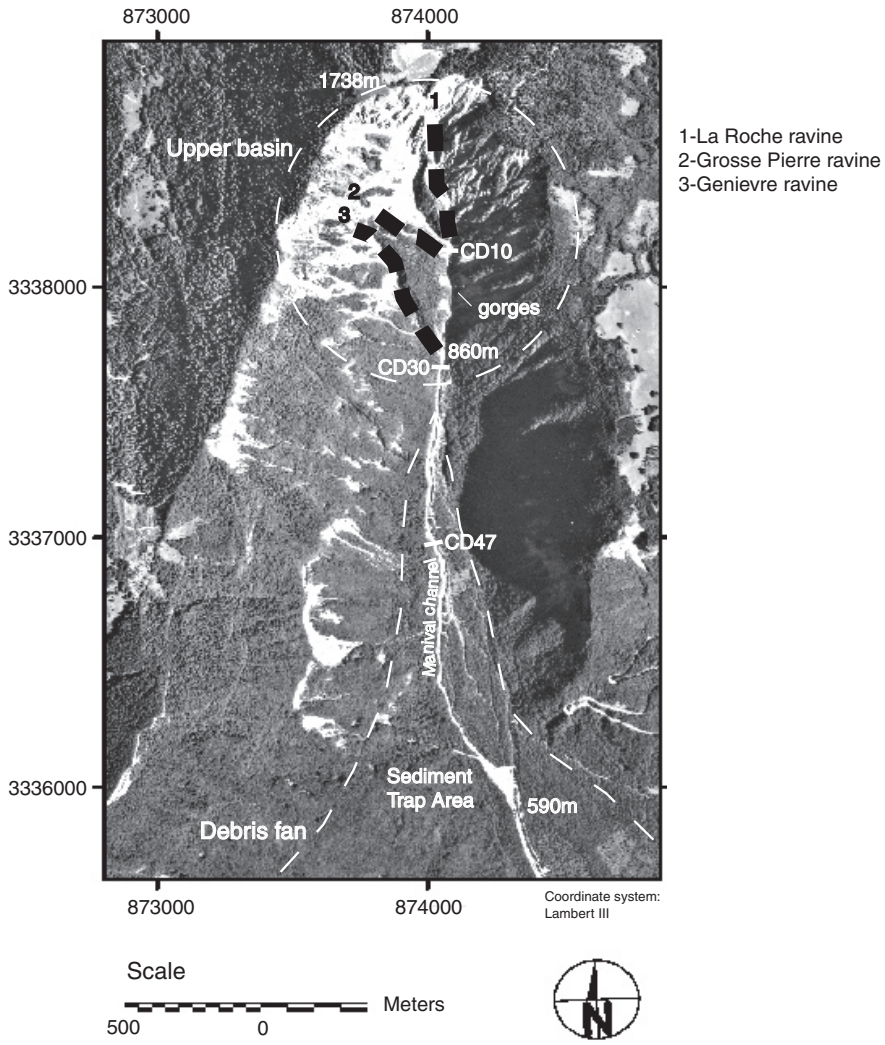


Figure 1-20
Le bassin versant du Manival (photographie aérienne orthorectifiée). CD30 représente le barrage RTM n°30

L'étude menée ici ne concerne que le bassin de réception et la zone de divagation du Manival. En aval, le cône de déjection moyen et inférieur est en partie déconnecté du reste du torrent par une plage de dépôt et connaît une évolution particulière, indépendante de ce qui se passe en amont (voir infra).

B. Géologie et lithologie

Le torrent du Manival entaille un anticlinal jurassique constitué essentiellement de calcaires et de marno-calcaires. La série stratigraphique des roches affleurantes, de l'amont à l'aval, se présente de la façon suivante (carte géologique détaillée de la France au 1/50 000- Feuille de Domène, 1969) :

- Berriassien (marno-calcaires à ciment) ;
- Tithonique (calcaires massifs formant des parois subverticales) ;
- Kimméridgien (petits bancs marno-calcaires alternant avec des lits de marne) ;
- Oxfordien terminal, Séquanien (calcaires marneux) ;
- Oxfordien supérieur et moyen Rauracien (marno-calcaires et marnes) ;
- Oxfordien inférieur (schistes argileux noirs).

Le Bec Charvet constitue l'extrémité méridionale du petit chaînon du col du Coq, qui s'allonge parallèlement à celui de la Dent de Crolles et qui résulte de la dissection du mont formé par le Jurassique de l'anticlinal de Perquelin (**Cf. Fig. 1-21 (a.P)**). Le torrent du Manival permet d'observer plus en détail la structure de l'anticlinal de Perquelin (**Cf. Fig. 1-21 (a.P)**) : on voit qu'il est traversé par deux failles de chevauchement à vergence est : la faille du Baure (**Cf. Fig. 1-21 (ϕ_B)**), qui passe au col du même nom et la faille du Manival (**Cf. Fig. 1-21 (ϕ_M)**), qui n'est qu'une cassure secondaire satellite de la précédente. En outre, sur les deux flancs du pli, on constate la présence d'une faille de chevauchement (**Cf. Fig. 1-21 (ϕ_C)**), à vergence ouest. Il s'agit sans doute des traces, déformées par le plissement et décalées par les autres failles, d'un "chevauchement du Bec Charvet" : cet accident secondaire est donc relativement ancien. Lorsque la neige souligne les strates, la partie haute du ravin du Manival permet de distinguer la faille de chevauchement du Bec Charvet, dont les crochons indiquent clairement le sens des mouvements (**Cf. Fig. 1-22**). Compte tenu de ce sens de rejet, il s'agit nécessairement d'une cassure antérieure au plissement qui a été basculée vers l'ouest, avec le flanc ouest de l'anticlinal de Perquelin dans lequel elle s'inscrit [Gidon, 2004]. On voit ainsi que les calcaires plus massifs du Tithonique se trouvent au sommet du versant en rive droite (ainsi qu'au niveau du Château Nardent en rive gauche) assez éloignés du Bec Charvet, alors qu'à l'aplomb de ce dernier, des strates plus friables constituées de marnes et de calcaires en alternance peuvent apporter des quantités importantes de matériaux au torrent.

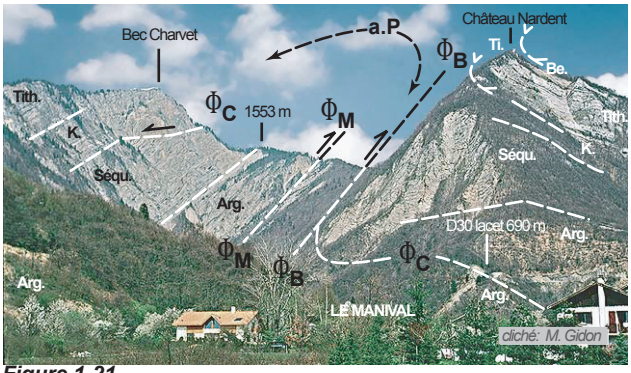


Figure 1-21
Le bassin du Manival, qui entaille l'anticlinal de Perquelin (a.P), est parcouru de plusieurs failles : principalement la faille du Baure (ΦB), mais aussi la faille du Manival (ΦM) et une faille de chevauchement (ΦC) (d'après Gidon, 2004)

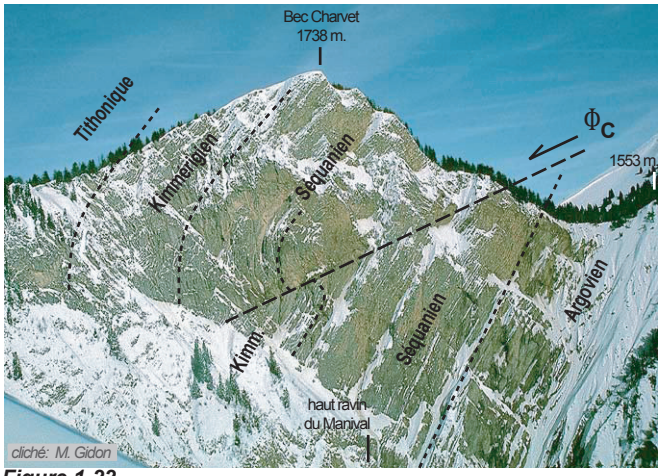


Figure 1-22
Représentation simplifiée de la faille de chevauchement du Bec Charvet et des différentes strates géologiques du bassin de réception du torrent du Manival (d'après Gidon, 2004)

En partie basse, le Manival entaille des terrains quaternaires : en premier lieu une couverture de formations gravitaires de versants, éboulis et écroulements anciens, puis les alluvions torrentielles de son cône de déjection et enfin des alluvions fluviatiles (Isère) et lacustres (lac postglaciaire) ainsi que des dépôts morainiques [Bénévent, 1915]. La butte témoin des Drogeaux, qui rappelle ces dernières formations datant du retrait glaciaire du Würm, pourrait être la plus spectaculaire moraine de la vallée du Grésivaudan [Gignoux et Moret, 1952] mais il est possible que le substratum callovien ("terres noires"

inférieures) [Barféty *et al*., 2000b] ait été simplement façonné en forme de crête morainique par l'érosion glaciaire [Barféty *et al*., 2000a].

C. La couverture végétale

Au XIX^{ème} siècle, le bassin de réception du Manival était complètement dénudé, tandis que les versants dominant la zone de divagation étaient couverts de taillis de chênes, de hêtres et de bois blancs en mélanges. L'étude des cadastres anciens et récents, ainsi que des photographies aériennes, montre que le cône de déjection était occupé par des champs de céréales, de la vigne et des vergers [Desplanches, 1999]. La comparaison de photographies de 1904 et de 2000 le confirme (**Cf. Fig. 1-23**). Elle montre aussi que les zones végétalisées sont sensiblement les mêmes, mais les images laissent à penser que l'on est passé d'une végétation herbacée et de broussailles à une végétation plus arborée. De nos jours, le bassin de réception et la zone de divagation sont en large partie boisés. Dès 1891, des travaux de correction active de génie biologique furent entrepris. Les berges du torrent furent végétalisées, avec plus ou moins de succès, au moyen de clayonnages et de plantations de cytises, aulnes blancs, saules, peupliers, pins sylvestres, pins à crochets et épicéas. Les berges et localement le lit du torrent ont récemment fait l'objet de diverses expérimentations biologiques. Sur le cône, les cultures ont été en grande partie abandonnées et les zones non construites se boisent progressivement. Aujourd'hui, la forêt occupe 80 % du bassin, les zones de prairie 7,5 % et les terrains nus 12,5 %. Ces derniers se concentrent principalement en tête de bassin [Gruffaz, 1997].

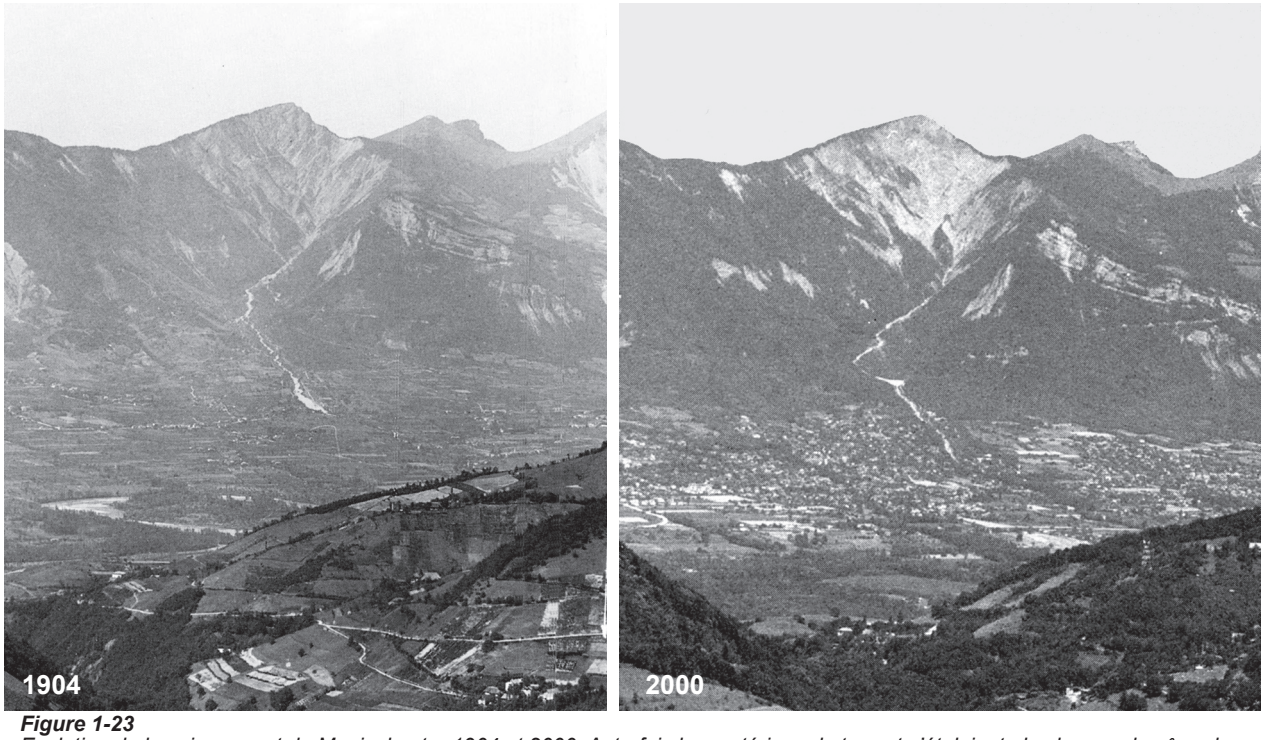


Figure 1-23
Evolution du bassin versant du Manival entre 1904 et 2000. Autrefois les matériaux du torrent s'étalaient plus bas sur le cône de déjection, alors que les cultures (vignes, céréales) remontaient bien plus en amont qu'actuellement (Blanc et Perrard, 1998)

D. Les conditions climatiques du bassin

La Chartreuse est soumise à un climat de type continental du fait de l'éloignement des mers et océans. Toutefois, elle est fortement influencée par les précipitations d'ouest à nord-ouest de type océanique. Cette dernière caractéristique associée aux reliefs importants du massif qui créent un effet de barrière, donne à la Chartreuse des précipitations soutenues et abondantes, de l'ordre de 2 000 mm. d'eau par an à Saint-Pierre-de-Chartreuse. L'hiver, cette influence montagnarde est caractérisée par des chutes de neige (310 cm. de neige au sol le 10/04/1970 au Col de Porte - 1325m.) et des températures assez basses (-21,4°C relevés le 12/01/1987 à Saint-Pierre-de-Chartreuse - 945 m.) [Météo-Isère, 2005]. Cependant, les conditions climatiques régnant sur le bassin versant du Manival, comme sur l'ensemble de la retombée orientale de la Chartreuse vers la vallée du Grésivaudan, tiennent plus des particularités locales, relief et exposition notamment, que de tendances générales. Le versant oriental de la Chartreuse est plutôt épargné par les perturbations venant de l'Ouest et connaît de ce fait un climat relativement doux et sec par rapports aux zones voisines.

De plus, le bassin du Manival, orienté plein Sud, est sujet à d'intenses pluies orageuses d'été, en partie responsables de la production de laves torrentielles. Mathys [1988] retenait dans une étude globale sur les torrents du Saint-Eynard, situés immédiatement à l'aval du Manival dans la vallée du Grésivaudan, une pluie journalière décennale de 100 mm, valeur calculée à partir des stations météorologiques les plus proches, en tenant compte du relief et de l'exposition. Etant données l'altitude et l'exposition du bassin du Manival, Gruffaz [1997] propose comme pluie annuelle moyenne, pour l'ensemble du bassin, une valeur de 1 250 mm.

Les données hydrométéorologiques du Manival et de ces environs sont reprises plus en détail dans la troisième partie de cette thèse.

4.3.3. Les travaux d'aménagement torrentiel et leurs impacts

Devant la violence de certains événements, le service de la RTM a cherché, depuis plus d'un siècle, à contrôler la dynamique des flux hydriques et sédimentaires du Manival. Outre la revégétalisation déjà citée, de nombreux travaux de correction torrentielle en génie civil ont été entrepris. Ces aménagements ont eu pour objectif de réduire la production et les transports solides dans le chenal d'écoulement. Sur le cône de déjection, ils protègent les biens et les personnes des destructions occasionnées par les crues.

Les petits barrages, ou seuils, tendent à stabiliser le profil en long du torrent (**Cf. Fig. 1- 24**). A l'état naturel, celui-ci aurait tendance à creuser son lit dans les pentes fortes et à alluvionner dans les sections à pentes faibles. Il y aurait donc un recul progressif de la crête du bassin versant par érosion régressive intense, ce double jeu d'abblation-accumulation tendant vers un profil d'équilibre [Besson, 1996] (**Cf. Fig. 1-25**).

Figure 1-24
Barrages et seuils de correction torrentielle sur le chenal du Manival et ses ravins affluents (clichés S.V-C.)

La construction de séries de seuils, plus d'une centaine dans le torrent du Manival, consiste à transformer le profil en long naturel du torrent en une succession de marches d'escalier faiblement inclinées vers l'aval. La pente générale du torrent est voisine de celle du profil d'équilibre naturel théorique du torrent non corrigé, mais sur des distances horizontales réduites. La forme en berceau de ces ouvrages permet de recentrer les écoulements afin d'éviter les divagations du chenal et l'affouillement latéral des ouvrages.

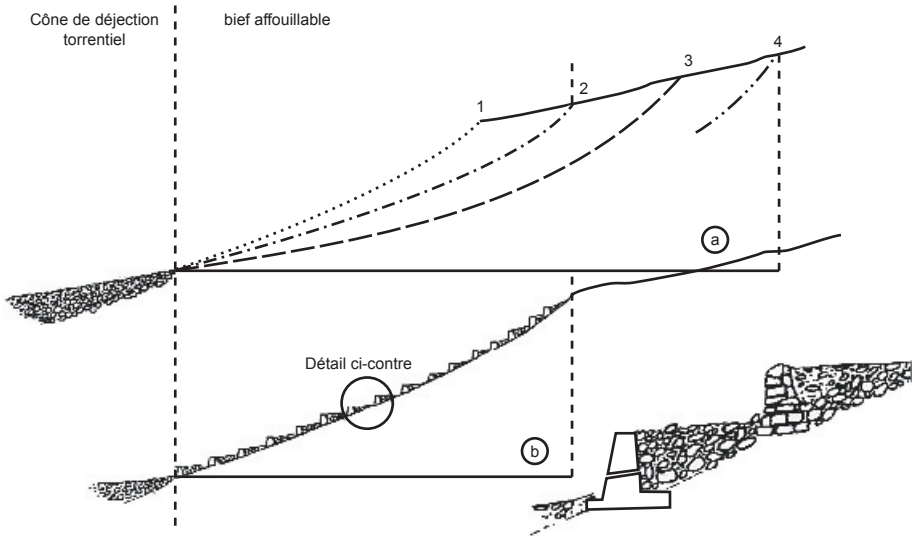


Figure 1-25
Le profil en long affouillé par érosion régressive (a) est stabilisé par une série de seuils (b) (d'après Besson, 1996)

L'objectif des travaux de correction dans le chenal est donc multiple :

- stabiliser les glissements dominant le talweg en fixant le profil en long à une côte minimale ;
- stabiliser les pieds de berges ;
- retenir les matériaux détritiques dans la montagne par édification d'aires de stockage et ainsi réduire le volume des dépôts sur le cône de déjection ;
- dissiper l'énergie des crues et des laves torrentielles en augmentant artificiellement les pertes de charge par la succession de chutes et de pentes plus faibles.

Dans le bassin du Manival, les travaux débutèrent en 1892. Dans la branche principale, d'abord par deux barrages en pierres sèches vers l'altitude de 900 m, dont un est toujours en place et en bon état ; les nombreux ouvrages ensuite construits, furent en partie réparés en 1969 et un grand nombre de seuils supplémentaires en béton armé ajoutés en 1984. Les travaux de correction sur les autres branches furent repris en 1973 et 1974 dans le bassin de Genièvre et complétés par des seuils en béton armé en 1984 dans le bassin de Grosse Pierre. Les dernières grosses réalisations ont concerné le ravin de la Roche qui a été équipé de 12 barrages câbles de 1993 à 1995 ; ces derniers sont constitués de gros filins d'acier ancrés dans la roche en place et tendus en travers du chenal. Actuellement, une centaine d'ouvrages composent la correction du bassin de réception (**Cf. Fig. 1-26**).

Dans la zone de divagation, on peut encore apercevoir de nombreux gabions dont une grande partie est toutefois détruite. Ils appartiennent à un ancien mode de gestion qui consistait à laisser divaguer et déposer au maximum les laves dans cette zone, puis à fixer ces dépôts à l'aide de gabions afin d'éviter les éventuelles reprises en charge de ces matériaux lors de crues ultérieures. Actuellement, le choix de gestion du service de la RTM est différent, le torrent étant maintenu dans un chenal unique où les débordements sont proscrits. C'est pourquoi, dans les zones accessibles, les effets des barrages sont complétés par des actions régulières de curage du chenal. Celles-ci sont destinées à éviter toute formation d'accumulation sédimentaire pouvant constituer une zone de départ de lave torrentielle ou obstruer partiellement le lit lors de crues, provoquant un débordement. Il est courant qu'une partie des matériaux curés soit replacés au pied des seuils présentant des traces d'affouillement de leurs fondations.

Depuis 1926, le cône de déjection du Manival est doté dans sa partie amont, d'une plage de dépôt. Celle-ci consiste en un élargissement artificiel associé à un affaiblissement de la pente. Ce changement de topographie est destiné à enrayer la dynamique d'une lave torrentielle ou d'un écoulement de crue chargé : par diminution de la capacité de transport, il provoque le dépôt des matériaux. Des digues latérales terrassées et, depuis 1992, un barrage filtrant édifié à l'aval clôturent cette plage de dépôt (***Cf. Fig. 1-27***). Le bon fonctionnement de cet ouvrage reposant sur un volume de stockage disponible de 25 000 m^3, il est régulièrement curé pour garder une efficacité permanente.

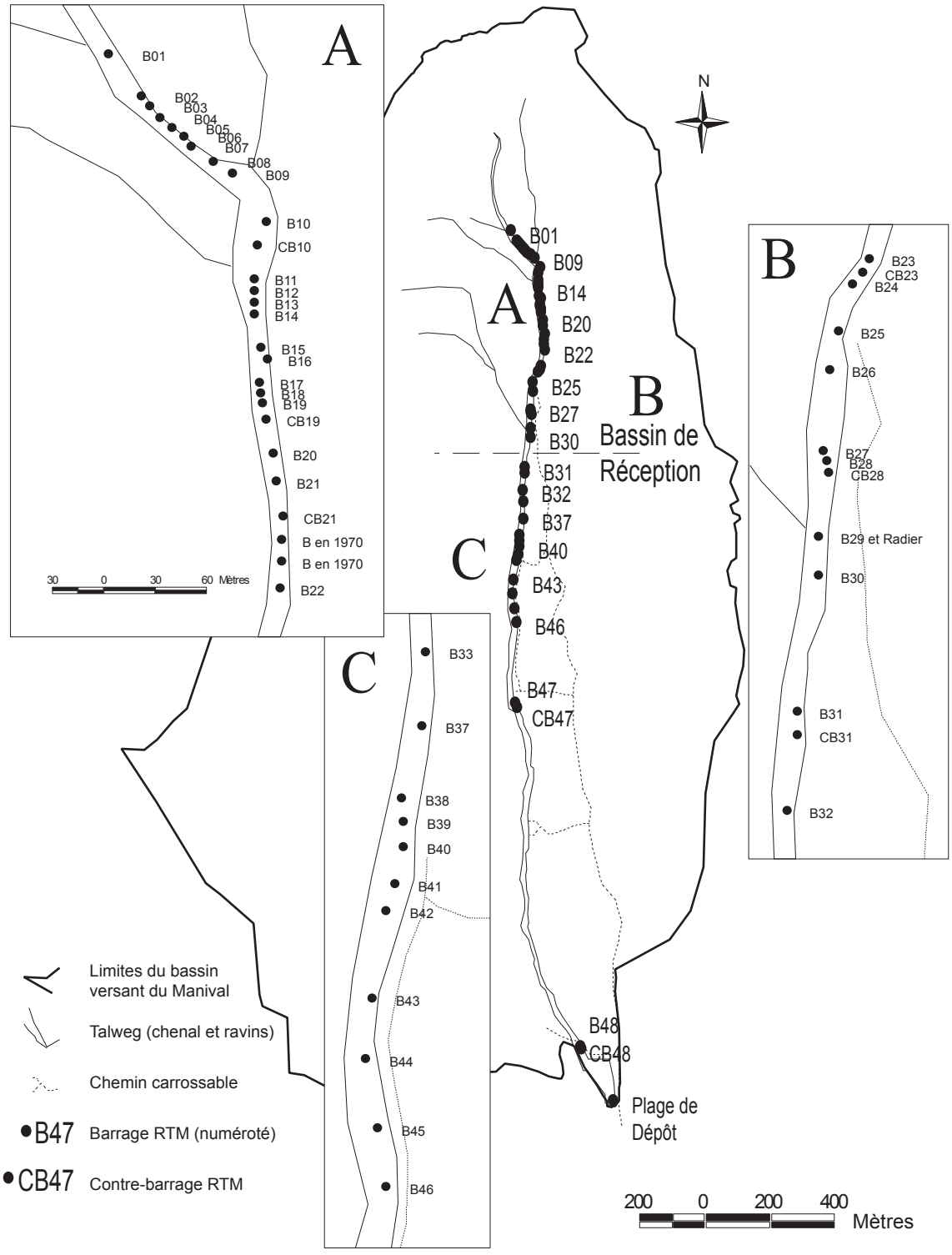


Figure 1-26
Localisation des ouvrages RTM du chenal du Manival (la baraque forestière est située en rive gauche au niveau du barrage RTM N°30

4.3.4. Les difficultés du travail de recherche en milieu torrentiel

Ces difficultés ont déjà été partiellement évoquées de manière indirecte dans les paragraphes précédents car elles influencent le choix des torrents d'étude ou les limites de certaines modélisations. Elles sont de deux ordres :

- des sources de données disponibles limitées,
- un milieu dangereux où il est difficile de faire de la recherche.

Figure 1-27
Vues de la plage de dépôt du Manival d'une capacité d'environ 25 000 m³ (clichés S.V-C.)

A. Peu de données disponibles

Les données historiques sont extrêmement utiles pour entreprendre toute étude torrentielle car elles permettent souvent à la fois de comprendre le fonctionnement du torrent et de compléter les données quantitatives concernant le transport solide. Elles peuvent, de plus, confirmer certaines hypothèses. Mais elles sont difficiles à obtenir pour de nombreuses raisons :

- archives dispersées ;
- documents perdus ou détruits ;
- données mal conservées ;
- sources de données mal décrites et/ou peu fiables.

Dans le cas de l'étude du Manival, les exemples illustrant ces difficultés d'obtention de données sont nombreux. Des documents sont dispersés dans différents lieux aux services de la RTM, aux archives départementales, dans divers bureaux d'études, etc. Certains de ces endroits ont même parfois été oubliés, ce qui est la porte ouverte à la disparition de données dont le potentiel d'information est réel. De nombreux services sont actuellement en train d'accomplir la lourde et fastidieuse tâche de centralisation et de classement des données.

La perte de données peut également venir de faits extérieurs historiques comme les guerres ou certaines catastrophes naturelles par exemple. Ainsi, des plans du bassin versant du Manival datant du début du XX^{e} siècle, mentionnent la présence d'un pluviomètre accumulateur Mougin installé dans le versant du bassin de réception en rive droite ; or ces données de précipitations n'ont pu être retrouvées.

Les sources de données ne sont pas toujours fiables et peuvent varier en fonction de la situation économique, politique ou sociale du moment. Ainsi, certains récits ou témoignages auront tendance à surestimer ou sous-estimer les volumes de matériaux et les dégâts, dans l'intérêt de certains, ou de manière inconsciente. Voici un autre exemple concernant la difficulté d'utilisation de certaines données : des études datant vraisemblablement des années 1960 ou 1970 et portant sur le suivi du profil en long du Manival et de profils en travers sur quelques années consécutives, n'ont malheureusement pas été datées et sont de ce fait difficilement exploitables. Le manque d'observations en général concernant les milieux torrentiels rend d'autant plus importantes les données historiques même si elles ne sont que qualitatives, car elle permettent bien souvent de confirmer certaines hypothèses par un recoupement d'informations.

B. Un milieu hostile

Dans les bassins versants torrentiels, l'acquisition de données de terrain n'est pas toujours facile. Cela pose des problèmes concernant les personnes, le matériel et les données.

Pour les personnes, de nombreuses zones escarpées sont d'un accès difficile et certains secteurs sont même très dangereux : chutes de blocs, passages de seuils, évolution en terrain pentu et instable,… (***Cf. Fig. 1-28***).

Pour le matériel, les mêmes raisons risquent à tout moment de l'endommager. A titre d'exemple, des orages estivaux ont détérioré une centrale d'acquisition de données pluviométriques placée dans le bassin de réception du Manival.

Figure 1-28
Evolution délicate dans des terrains souvent dangereux... (Clichés S.V-C.)

Enfin, concernant la qualité des données, il n'est souvent pas possible d'évoluer avec du matériel trop encombrant ou trop lourd qui pourrait donner des résultats plus précis. Et surtout, dans cet espace souvent très instable, les problèmes de calage topographique par rapport à un niveau de référence sont fréquents ; une saison complète de mesure d'un ravin du Manival n'a pas pu être exploitée faute de pouvoir caler ces données de manière satisfaisante.

En conclusion et pour résumer à l'issue de ce chapitre dédié à la problématique posée pour ce travail de thèse, nous pouvons formuler les méthodes, outils et objectifs de recherche à suivre. La demande sociale, par le biais du service de la RTM, est d'acquérir des outils fiables de prédiction des volumes sédimentaires pouvant être apportés par les torrents, afin de se prémunir au mieux contre les catastrophes torrentielles qui font de nombreux dégâts et parfois même des victimes humaines. L'observation des torrents a montré que les laves torrentielles constituaient, pour le transport solide, le processus le plus efficace, particulièrement dans les Alpes du Nord françaises. De plus, il n'existe que peu de modèles applicables aux laves, contrairement aux autres modes de transport fluviatile où des formules hydrauliques ont pu être adaptées. Bien que le problème réside dans l'apport d'un volume de matériaux, quel que soit son mode de transport, nous nous intéresserons plus particulièrement aux laves torrentielles. Les formules utilisées actuellement pour les laves en ingénierie torrentielle sont des formules globales, à l'échelle du bassin versant, empiriques et statistiques. Leur limite essentielle vient du fait qu'elle ne prennent généralement en compte que des paramètres très généraux du bassin versant comme sa surface. Or la **figure 1-16**, schéma conceptuel du fonctionnement torrentiel, permet de comprendre que ces paramètres n'indiquent qu'une prédisposition plus ou moins forte du système à se rapprocher d'un seuil d'instabilité (crues soudaines caractéristiques) sans qu'ils ne varient dans le temps, tout du moins à l'échelle des quelques décennies qui intéressent les gestionnaires des risques torrentiels. Pour les torrents ayant une fourniture sédimentaire limitée (second groupe de la **figure 1-17**), la variable essentielle dans le fonctionnement du système torrentiel est le degré de remplissage sédimentaire du chenal. La recharge en matériaux détritiques représente ainsi un stock facilement mobilisable par un événement torrentiel. C'est donc sur ce point fondamental que notre travail s'est porté. Le bassin versant du Manival a été choisi pour mener une étude approfondie d'un système torrentiel sur la base de bilans sédimentaires. Au vu des difficultés rencontrées dans l'utilisation des archives classiques, nous avons fait le choix décisif de travailler principalement à partir de données issues de mesures sur des photographies aériennes. Cela implique la mise en œuvre et la maîtrise de méthodologies et de techniques exigeantes, qui sont exposées dans la seconde partie de la thèse.

SECONDE PARTIE
Méthodologie et outils de mesure pour la quantification d'un état sédimentaire du chenal

1. Outils d'acquisition des données topographiques
2. Collecte des données : les notions de profil en travers et de section d'ablation maximale
3. Optimisation de l'échantillonnage topographique
4. Synthèse de la technique d'échantillonnage mise en œuvre

Tableau 2-1
Outils topographiques et méthodologie de mesure adaptés pour répondre à un objectif précis

Outils	Nivellement de terrain — Photogrammétrie
Mise au point d'une méthodologie de mesure spécifique au chenal torrentiel	Semis dense de points topographiques mesurés ↓ Tests de qualité sur les résultats ↓ Optimisation du semis de points (rapport optimal entre la qualité des résultats et la quantité des informations à recueillir) ↓ Chaîne de traitement (calculs) ↓ **Evaluation des stocks sédimentaires** Etat sédimentaire actuel — Etude contemporaine ↓ Etat sédim. à différentes dates — Etude diachronique ↓
Objectif	Connaissance du fonctionnement de la dynamique sédimentaire du chenal

Nous avons vu précédemment d'une part, que par l'étude des modèles globaux disponibles, ceux-ci proposent des résultats limités et, de ce fait ne présentent pas un grand intérêt pour les praticiens et les gestionnaires ; d'autre part, que les concepts en vigueur dans les systèmes torrentiels [Schumm, 1973 ; Heward, 1978 ; Kienholz et Mani, 1996 ; Zimmermann *et al.*, 1996 ; Zimmermann *et al.*, 1997 ; Bovis et Jakob, 1999] rendent nécessaire la connaissance et la prise en compte de la dynamique des sédiments pour mettre en place de nouvelles méthodes d'estimation des transports solides. Au sein du bassin, les sources de sédiments sont les versants. Elles sont souvent concentrées dans le bassin de réception, bien que sur certains torrents, la quasi totalité des sédiments proviennent de la déstabilisation des versants par des phénomènes de glissement des pentes dominant le chenal d'écoulement. Classiquement en géomorphologie, on distingue deux phases : l'ablation et le transport. La phase d'ablation consiste en une préparation du matériel par des processus d'altération (physiques ou chimiques) [Tricart, 1977]. Une fois cette préparation accomplie, les particules sont déplacées par toute une série de processus plus ou moins rapides et en quantité plus ou moins grande. Tous ces mécanismes fonctionnent à des rythmes qui leur sont propres en grande partie liés aux conditions hydroclimatiques. Ils se relaient alors pour acheminer les sédiments jusqu'au chenal [Tricart, 1960 ; Peiry, 1990].

Ces relais de processus se poursuivent dans le chenal torrentiel pour entraîner les sédiments à l'exutoire du bassin versant [Tricart, 1960]. Les volumes ainsi déplacés, lors de crues, peuvent être conséquents et générer des risques. C'est donc la disponibilité de matériel dans le chenal qui permet le développement des laves torrentielles et bien souvent leur déclenchement. Il devient alors nécessaire de pouvoir connaître le stock sédimentaire du chenal à un moment donné, quels qu'aient été les processus de versants ayant permis sa recharge sédimentaire.

Afin de mieux connaître la dynamique torrentielle, l'objectif de cette seconde partie est double :

- Présenter les outils de mesure topographique utilisés pour analyser des variations temporelles du stock sédimentaire par des techniques et des outils topographiques adaptés à la géomorphologie. Il s'agit de la stéréophotogrammétrie, qui permet de faire des analyses diachroniques en travaillant sur des photographies aériennes d'archives et du cheminement topographique de terrain, utilisé pour les mesures contemporaines.
- Déterminer et mettre au point la méthodologie de mesure adaptée à la fois aux objectifs d'élaboration de bilans sédimentaires, aux entités que sont les chenaux torrentiels et aux outils topographiques utilisés (**Cf. Tab. 2-1**).

1. Outils d'acquisition des données topographiques

Outil fréquemment utilisé en géomorphologie, la topométrie a été privilégiée pour mesurer le degré de remplissage du chenal. Bien que toute une série de méthodes de mesure permettent d'étudier la dynamique sédimentaire [Peart, 1989], elles n'ont pas été retenues soit parce qu'elles ne sont pas

toujours adaptées au système torrentiel étudié, soit à cause de leur coût élevé. Parmi celles-ci, seules des méthodes mises en œuvre sur des rivières torrentielles ou sur des torrents sont rapidement décrites ci-dessous : méthodes de mesures directes du débit solide ou encore méthodes de marquage et de traçage des sédiments.

Bien que dans les cours d'eau, de nombreux auteurs aient mesuré le flux de Matières En Suspension (MES) de manière ponctuelle [Eisma, 1993 ; Moody et Meade, 1994 ; Peiry, 1996] ou sur une section en travers [Horowitz et al., 1992 ; Olive et Rieger, 1992 ; Veyrat-Charvillon, 1998], dans les torrents les fortes turbulences permettent mal de les distinguer des matériaux charriés (**Cf. Fig. 1-3**). De plus, les volumes transportés étant moindres, les MES en milieu torrentiel sont assez peu étudiées [Rickenmann, 1991 ; Mathys *et al.*, 1996 ; Richard et Mathys, 1997]. Liébault [2003] a mesuré sur des profils en travers la charge de fond mobilisée lors de crues de rivières torrentielles drômoises par la technique des chaînes d'érosion. Ces dernières, placées dans le lit du chenal ne résisteraient pas aux crues torrentielles beaucoup plus dévastatrices, et sont donc inadaptées. Dans le domaine torrentiel, des estimations de la concentration solide de lahars ont été menées, en Chine ou en Indonésie [Lavigne, 1998], par prélèvements réguliers de l'écoulement à l'aide de seaux remontés sur la berge avec une corde. Mais cette technique, qui nécessite d'être présent lors de la crue, ne peut pas non plus être utilisée en toute sécurité sur n'importe quel terrain. Pour les lahars ou les laves torrentielles, l'utilisation de géophones permet par enregistrement des sons, des mesures indirectes sur l'intensité de l'événement [LaHusen, 1996 ; Lavigne, 1998 ; Suwa *et al.*, 2000 ; Arattano, 2003]. Des systèmes d'observation des laves torrentielles par caméra vidéo ou appareil photographique permettant également de s'affranchir du risque lié à la crue [Chang, 2003 ; Ikeda et Hara, 2003 ; Zhang et Chen, 2003] rendent possible des mesures par traitement d'images [Lavigne *et al.*, 2003]. Récemment, en Suisse, un plateau de pesage vient d'être installé sous le tablier d'un pont où le passage de laves torrentielles est relativement fréquent (Bardou, com. perso.). L'inconvénient majeur de ces trois dernières techniques, bien qu'elles soient mieux adaptées aux torrents, est leur coût conséquent.

Le suivi du trajet des matériaux a été mené dans les cours d'eau à l'aide de différents marqueurs comme la peinture, les aimants ou des émetteurs radios [Butler, 1977 ; Schmidt et Ergenzinger, 1992]. Ployon [2002] a appliqué ce type de méthode sur un secteur restreint d'une rivière torrentielle avec de fortes contraintes de mise en place expérimentale, liées au terrain d'étude. Il était difficilement envisageable de mettre en place un tel suivi dans des bassin torrentiels beaucoup plus escarpés. Un bloc artificiel muni de capteurs internes que l'on peut placer dans le chenal afin de suivre son évolution lors d'une crue a été construit [Hanisch *et al.*, 2003], mais son coût est extrêmement élevé. Certains éléments radioactifs, comme le Césium-137, présents dans le sol suite aux essais nucléaires atmosphériques ou à l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl, constituent également des traceurs de sédiments [Campbell *et al.*, 1988 ; Peart et Walling, 1988 ; Larsen, 1990 ; Hasholt et Walling, 1992 ; Loughran *et al.*, 1992 ; Quine *et al.*, 1992 ; Walling et Quine, 1992 ; Sutherland, 1996]. Les méthodes utilisant les éléments radioactifs sont cependant limitées par la présence d'un sol ; or, dans les zones érodées ou en érosion

rapide comme les zones de production sédimentaire du bassin de réception torrentiel, il n'y a pas de pédogénèse car elle n'a pas le temps de se mettre en place. Les particules sont décapées au fur et à mesure par les processus d'érosion. Parfois, la couleur des sédiments permet de localiser les sources de production comme par exemple en Indonésie, lorsque des affluents proviennent de deux types de volcans différents ou lorsqu'il est possible de distinguer les sédiments oxydés provenant des berges, des matériaux récents fournis en permanence par les volcans actifs [Lavigne *et al.*, 2003]. La couleur noire des crues printanières de l'Isère indique que les sources de matériaux se situent principalement dans les schistes noirs de la vallée de l'Arvan, affluent de l'Arc (vallée de la Maurienne), au moment de la fonte des neiges [Latulippe et Peiry, 1996 ; Veyrat-Charvillon, 1998].

Finalement, après avoir passé en revue ces différentes techniques, notre étude sur le fonctionnement de la dynamique sédimentaire s'est principalement orientée vers les méthodes de bilans sédimentaires [Dietrich et Dunne, 1978 ; Bernard-Allée et Cosandey, 1991 ; Descroix, 1991 ; Harvey, 1991 ; Reid et Dunne, 1996 ; Bravard et Petit, 1997] à l'aide de techniques basées sur des mesures topographiques : l'étude de profils en long et de profils en travers [Malavoi et Souchon, 1989 ; Brasington *et al.*, 2003 ; Liébaut, 2003], ou l'élaboration et la comparaison de Modèles Numériques de Terrain (MNT) [Hubbel, 1964 ; Ashworth et Ferguson, 1986 ; Lane *et al.*, 1994 ; Westaway *et al.*, 2000 ; Brasington *et al.*, 2003].

En complément, deux autres méthodes ont été utilisées : la cartographie des zones sources de sédiments et le piégeage des matériaux. La cartographie des surfaces de production a été menée, par exemple, par Latulippe & Peiry [1996] à l'échelle du bassin versant de l'Isère à Grenoble. Ce type de méthode s'est largement développé avec l'utilisation croissante des Systèmes d'Information Géographique [White, 1989 ; Dalla Fontana et Marchi, 1998 ; Liébaut, 2003] et peut fournir des informations importantes sur la recharge sédimentaire du chenal. Certains auteurs utilisent le piégeage des matériaux pour évaluer les quantités transportées : dans certaines études, les volumes de transports solides sont récupérés dans des caisses ou des bidons à l'échelle d'une ravine ou d'une parcelle [Roose et Bertrand, 1971 ; Richard et Mathys, 1997 ; Rovéra *et al.*, 1999 ; Diallo *et al.*, 2000] ; à l'échelle du bassin versant, des pièges à sédiments sont installés à leur exutoire, permettant ainsi d'évaluer les apports de grands bassins [Lahlou, 1988 ; Brochot, 1993 ; Duck et McManus, 1994]. Dans notre étude, nous avons tiré parti de la gestion actuelle du risque par le service de la RTM qui a entraîné la mise en place d'infrastructures dont des plages de dépôt. La totalité des matériaux est alors piégée, puis régulièrement extraite avec des engins mécaniques. Même si les données des volumes curés auraient pu en théorie être exhaustives, cela n'est pas toujours le cas car il faut garder à l'esprit que le but premier du service de la RTM a toujours été la gestion du risque et non un travail de recherche.

Pour étudier le fonctionnement de la dynamique sédimentaire du torrent du Manival, il était nécessaire que notre étude se place dans la durée, fixée à quelques décennies pour être en corrélation avec l'étude des risques torrentiels. Les informations anciennes que l'on peut récupérer sont généralement

ponctuelles. Cela a impliqué une approche diachronique, qui a été d'autant plus incontournable qu'aucun événement conséquent de lave torrentielle n'a eu lieu durant les quelques années de travail sur le terrain. Hormis les photographies aériennes, aucune information d'archive n'était suffisamment objective et exhaustive pour mener à bien cette étude. Bien que certains travaux utilisent, pour reconstituer les coulées des différentes laves torrentielles, la dendrochronologie [Strunk, 1992 ; Derruau, 1996 ; Van Steijn, 1996 ; Astrade, 2003 ; Stefanini et Ribolini, 2003 ; Stoffel *et al.*, 2003] ou la lichénométrie [Rapp et Nyberg, 1981 ; Innes, 1985 ; Van Steijn, 1996 ; Decaulne, 2001 ; Jacob *et al.*, 2002] ces méthodes sont inadaptées. Elles sont liées à la stabilité des matériaux et servent ainsi à dater une durée sans crue ou l'âge des coulées et à retrouver les canaux mais uniquement sur le cône de déjections. Ici, l'objectif est autre puisqu'il s'agit de mesurer des volumes transportés.

Ainsi, ce travail va consister à reconstituer des volumes de matériaux par le suivi diachronique de la topographie de profils en travers. Pour ce faire, nous nous sommes orientés d'une part, vers la photogrammétrie et les photographies aériennes anciennes, et d'autre part la mesure topographique directe de terrain.

1.1. La stéréo-photogrammétrie

Bien que renfermant des informations fiables et objectives, les photographies sont des représentations déformées de la réalité, ce qui rend impossible les mesures directes. Deux techniques permettent de s'affranchir de ces déformations afin d'obtenir les coordonnées de points : la photogrammétrie et le calcul d'une orthophotographie. Cette dernière n'existant pas pour la zone d'étude, il faut la créer à partir d'une photographie et d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) [Muraz *et al.*, 1999]. Le MNT le plus précis disponible dans le commerce (Institut Géographique National) est composé d'un maillage de points distant de 50 mètres. Pour des besoins cartographiques nous avons créé une orthophotographie du bassin versant du Manival sur le logiciel *Imagine* d'*Erdas* (**Cf. Fig. 1-19**), qui montre que sa résolution n'est pas suffisante pour permettre des mesures précises dans le chenal ; le MNT doit être plus détaillé. La méthode généralement utilisée pour générer un MNT qui soit suffisamment précis pour cette superficie est la photogrammétrie sur un couple de photographies. Nous avons donc choisi d'utiliser directement la technique photogrammétrique qui présente l'avantage, considérable pour des études géomorphologiques, d'une vision directe du relief en trois dimensions [Hurault, 2000].

L'utilisation de la photogrammétrie comme outil de mesure s'est donc imposée et nous a permis de faire une étude diachronique de l'état sédimentaire du chenal torrentiel du Manival à partir des séries de photographies aériennes disponibles depuis la seconde moitié du XX^{e} siècle.

1.1.1. Présentation de l'outil

A. Définition

La photogrammétrie permet d'effectuer des mesures topographiques directement sur des photographies, ce qui constitue une alternative aux mesures topographiques classiques de terrain. Le mot photogrammétrie tire ses origines des mots grecs "photo" (lumière), "gramma" (dessiné) et "metron" (mesure). Il signifie donc littéralement "mesure sur photographie". Ces mesures sont rendues possibles par l'usage de la stéréoscopie qui a l'avantage de pouvoir restituer une image en trois dimensions.

Discipline à part entière, la photogrammétrie est définie par Slama [1980, p.1] comme "(…) l'art, la science et la technologie d'obtenir des informations fiables sur des objets physiques et leur environnement grâce à des processus d'enregistrement, de mesure et d'interprétation d'images photographiques (…)". En fait cette technique ne se limite pas seulement aux photographies aériennes, mais s'applique à toutes formes de photographies, qu'elles soient aériennes ou terrestres, verticales ou obliques. La condition indispensable est que l'objet ou le lieu à mesurer ait été photographié à partir de deux points de vue différents.

Pour la géomorphologie, quatre avantages majeurs de la photogrammétrie ont été bien décrits par Lane *et al.* [1993] : la possibilité d'effectuer beaucoup plus de points de mesure qu'avec les techniques traditionnelles de terrain, de faire une étude diachronique, d'augmenter la fréquence des mesures, et de faire les mesures sans accéder au site lorsque ce dernier est dangereux ou lorsqu'il existe des risques de destruction des formes. Cet outil de mesure peut aussi se substituer aux techniques de topographie de terrain pour diverses raisons : coût concurrentiel, étude de lieux ou d'objets sur photographies anciennes. Suivant l'évolution historique de cette discipline transversale, les exemples d'applications dans des domaines divers et variés sont nombreux que ce soit en urbanisme, en médecine, en systèmes de réseaux, etc. [Al-garni, 1996 ; Baillard *et al.*, 1998 ; Veldhuis et Vosselman, 1998 ; Mitchell et Newton, 2002].

B. Historique et applications

C'est en 1859 que le colonel français A. Laussedat présenta à l'Académie des Sciences, une méthode de détermination de coordonnées de points basée sur un calcul d'intersection spatiale à partir d'un couple de clichés de l'objet. Parallèlement, l'architecte allemand A. Meydenbauer, à qui l'on doit le terme de photogrammétrie, utilise avec succès ces techniques dans des travaux architecturaux de grande envergure [Henry, 2004b].

Les premiers appareils de restitution qui utilisent la stéréoscopie se sont développés au début du vingtième siècle. Les progrès continus de la conception et de la fabrication des appareils de restitution et des chambres de prises de vue permirent ensuite un essor rapide et important de la cartographie à partir de photographies aériennes, en particulier durant la seconde guerre mondiale où le besoin en

cartes d'état-major fut particulièrement important. La photogrammétrie a été d'un usage assez étendu dans les années mille neuf cent cinquante jusqu'aux années mille neuf cent soixante-dix, en particulier dans des domaines comme le génie civil [Wickens et Barton, 1971 ; Moore, 1973 ; Scott, 1978 ; Veress *et al.*, 1980] ou l'industrie minière [Massa, 1958 ; Moore, 1974 ; Huberty et Anderson, 1990]. Cependant peu d'études géomorphologiques se sont inspirées de ces types d'applications. Bien que les utilisations cartographiques aient été les plus nombreuses [Dalsgaard, 1978], certains géomorphologues ont vu dans la possibilité d'effectuer des analyses diachroniques un avantage intéressant pour leur discipline [Lane *et al.*, 1993 ; Lawler, 1993]. Curry [1967] a observé des processus de versant à l'aide d'appareils photographiques classiques de 35 mm, mais la faible précision des résultats a limité leur utilisation aux dynamiques sédimentaires extrêmes. Cette technique a été utilisée dans le domaine des glaciers pour observer leurs fluctuations [Naqash, 1965 ; Brecher, 1986] ou l'évolution des moraines [Small *et al.*, 1984] ; également dans celui des glissements de terrain et des instabilités de pente [Burton, 1970 ; Matthews et Clayton, 1986] où l'observation stéréoscopique permet une meilleure détection des faibles ruptures de pente. Ce n'est que dans la décennie 1990 que l'on trouve dans la littérature de plus nombreuses études géomorphologiques utilisant la photogrammétrie, dans des domaines très variés : géologie [Stevens *et al.*, 1992], processus de versants [Chandler et Moore, 1989 ; Coe *et al.*, 1997], glissements de terrains [Chandler et Brunsden, 1995 ; Powers *et al.*, 1996], érosion de ravines [Egels *et al.*, 1989], érosion de berges [Lawler, 1993 ; Barker *et al.*, 1997], dynamique fluviale [Stojic *et al.*, 1998 ; Lane, 2000], relief aride [Kirby, 1991], mouvements de dunes [Kidson *et al.*, 1989], etc.

La stéréo-photogrammétrie sur photographies a peut-être été un peu délaissée lors de l'apparition des vues satellites et de l'avènement de la télédétection [Zhizhuo, 1996 ; Muraz *et al.*, 1999 ; Hurault, 2000]. En France, la photogrammétrie n'est principalement utilisée que par la cellule de photo-interprétation de l'Institut Géographique National (IGN) dans un but cartographique et par quelques bureaux d'études spécialisés dans cette technique. Les formations en photogrammétrie sont rares et généralement limitées à quelques écoles d'ingénieurs. En géomorphologie les développements français de cette méthode sont encore peu nombreux et récents. Citons par exemple les travaux de Henry *et al.* [2002], associant une équipe du laboratoire de génie civil de l'Ecole Nationale des Arts et Industries de Strasbourg et des chercheurs de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, sur le glissement de terrain de Super-Sauze. Bien que cette technique nécessite des compétences particulières, le développement informatique permet à l'heure actuelle une diffusion plus large de cet outil.

Le potentiel d'analyse diachronique permis par les mesures photogrammétriques, offre un outil idéal pour étudier les changements topographiques moyens causés par les processus de mouvements en masse tels que les laves torrentielles [Brunsden, 1993]. Habituellement, les variations de volumes sédimentaires sont appréhendées par soustraction de mesures altitudinales entre différents profils en travers ou différents Modèles Numériques de Terrain (MNT). Les MNT sont créés à partir des mesures directes sur les photographies, et ont été largement utilisés pour des applications géomorphologiques [Band, 1986 ; Tribe, 1991 ; Dietrich *et al.*, 1993 ; Lundstrom *et al.*, 1993 ; Brasington *et al.*, 2003],

sachant que leur maillage doit être bien adapté à l'échelle du processus ou des formes étudiées. La comparaison de profils en long et en travers est plus fréquemment utilisée en géomorphologie fluviale [Ashworth et Ferguson, 1986 ; Peiry, 1997 ; Bravard *et al.*, 1999 ; Landon, 1999 ; Vautier, 2000 ; Gurnell *et al.*, 2002].

La connaissance de la précision des mesures, en particulier verticale, est cruciale pour toute étude géomorphologique et dépend grandement de l'échelle, elle-même souvent liée à l'altitude de prise de vue [Lane *et al.*, 1993 ; Fryer *et al.*, 1994 ; Hashimoto, 2000 ; Brasington *et al.*, 2003]. Il va de soi que l'imprécision des mesures doit être bien plus faible que les variations sédimentaires étudiées ; c'est pourquoi la plupart des études utilisent des photographies à grande échelle généralement supérieure à 1/10 000^{e}. A la différence de ces études, nous avons utilisé les photographies d'archives disponibles avec des échelles moyennes à partir de 1/30 000^{e}, misant sur le fait que les variations topographiques des milieux torrentiels ont d'assez fortes amplitudes. Cette approche a été menée en Suisse pour l'étude des laves torrentielles de l'Illgraben, où un écroulement de plusieurs millions de mètres cube et des érosions et dépôts dans le chenal de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur ont été mis en évidence malgré des imprécisions assez fortes sur les mesures photogrammétriques [Kuczera, 1999 ; Bardou, 2002].

1.1.2. Principes de la restitution numérique

A. Principe de fonctionnement

La stéréoscopie qui permet la vision en trois dimensions à partir d'images planes reproduit le principe physiologique de la vision humaine qui, du fait de l'écartement des deux yeux, observe un objet unique à partir de deux points de vue différents. A partir des photographies, le principe général implique donc que dans le même temps, l'œil gauche observe la photographie de gauche et l'œil droit celle de droite. Les stéréoscopes manuels, qui permettent principalement l'observation, utilisent pour cela un jeu de miroirs. Pour effectuer des mesures de façon confortable, les appareillages à mettre en œuvre sont plus complexes. Il en existe deux catégories : des restituteurs optiques, assez volumineux, dans lesquels les images (films, photographies,…) sont placées sur des plateaux mobiles dans l'espace, et des restituteurs numériques qui sont en fait des logiciels utilisant le support informatique où les images sont alors en permanence sur le même plan. C'est ce dernier outil que nous avons utilisé.

B. Restituteur utilisé : Poivillier E.

Pour obtenir des données en 3D, nous avons utilisé le restituteur numérique *Poivilliers E. Anaglihr* version 5.3-o [Egels, 2001]. Les avantages ayant déterminé le choix de ce logiciel sont les suivants : il est fourni gratuitement dans le cadre de l'enseignement et de la recherche, il fonctionne sur un ordinateur classique de type PC équipé d'un processeur pentium et d'une carte graphique VGA, tous les fichiers de travail sont en mode Ascii (de type .txt) ce qui les rend assez simples et facilement transférables sur

tout autre logiciel (tableur, SIG,…). Par contre, il est limité à des images en noir et blanc de 250 Mo au maximum chacune. En fait, le restituteur n'affiche pas les deux images en même temps à l'écran, mais alternativement, à une fréquence de balayage assez élevée (balayage vertical supérieur à 100Hz) ce qui donne une impression de simultanéité. Afin de voir en stéréoscopie, il faut utiliser soit des lunettes anaglyphes (rouge d'un coté et vert de l'autre), les images sont alors colorées en vert et en rouge, soit des lunettes à cristaux liquides qui ont une fréquence d'obturation en phase avec la fréquence d'affichage des images (connectées à l'ordinateur par branchement ou liaison infrarouge) (Cf. Manuel du restituteur Anaglihr Poivilliers E. en annexe).

C. Procédé général d'utilisation

Pour observer et restituer les coordonnées tridimensionnelles d'un point, il est nécessaire de superposer les deux images au niveau de ce point, alors qu'elles ne sont pas identiques puisque les prises de vues sont différentes. Cette superposition s'effectue en deux temps que nous avons détaillés dans les paragraphes suivants : suppression de la parallaxe y par la mise en place d'un modèle qui prend en compte les différentes distorsions de l'image, puis suppression de la parallaxe x par translation des images par l'opérateur.

On peut associer à chaque image un repère plan orthogonal, x, y, ayant pour origine le centre de l'image. Les axes des abscisses des deux images, x_1 et x_2, suivent l'axe de vol. Les coordonnées du point que l'on veut mesurer sont notées X, Y, Z. En se rapprochant de ce point, le modèle mathématique annule automatiquement la parallaxe y, c'est-à-dire l'écart sur l'axe des y entre les deux photographies (**Cf. Fig. 2-1**). Ensuite l'opérateur annule, à l'écran, la parallaxe x. Plus concrètement, sur des photographies aériennes verticales, la parallaxe x est directement corrélée à l'altitude, donc l'opérateur considère le curseur comme un ballonnet vu de dessus qu'il essaie de poser au sol. Une fois au sol, la parallaxe x est connue et on obtient alors les coordonnées X, Y, et Z du point de mesure. L'opérateur doit répéter cette opération pour tous les points de mesure. Il existe des logiciels qui automatisent ce traitement, par un système de corrélation d'image. Ce dernier procédé est très intéressant pour générer des modèles numériques de terrain (MNT), mais il engendre également de nombreuses erreurs et le travail d'un opérateur reste nécessaire.

Le modèle est essentiel car il permet de corriger les erreurs de distorsions de l'image liées :

- aux conditions de la prise de vue,
- au relief du terrain,
- à l'objectif de l'appareil photographique.

Les conditions de prises de vues aériennes engendrent inévitablement certaines déformations, d'autant plus que le relief est marqué. L'altitude de la prise de vue influence directement l'échelle globale de la photographie. L'angle oblique de prise de vue altère l'homogénéité de l'échelle à l'intérieur de cette photographie. Cet angle dépend des rotations de l'avion (ou autre engin de vol) selon trois axes, que l'on

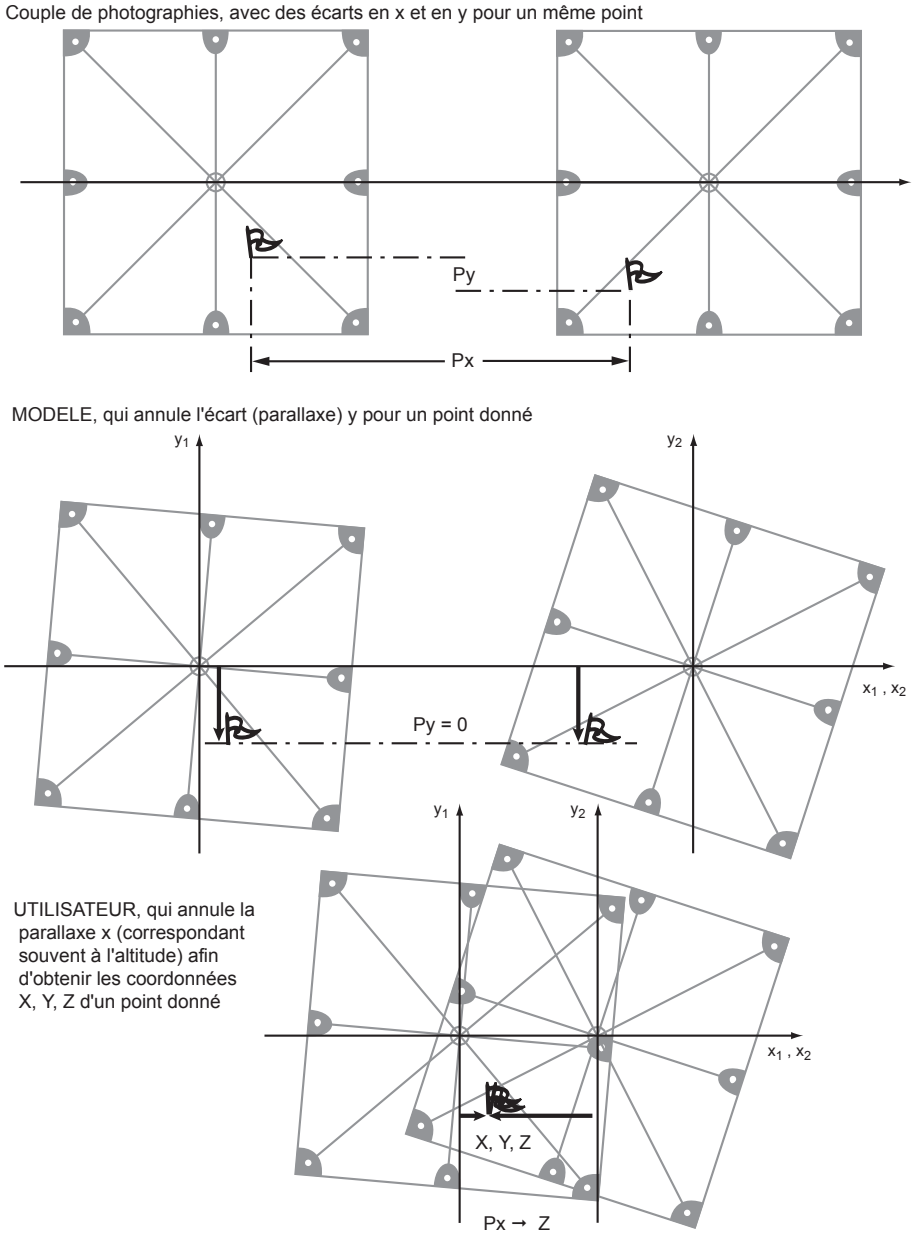
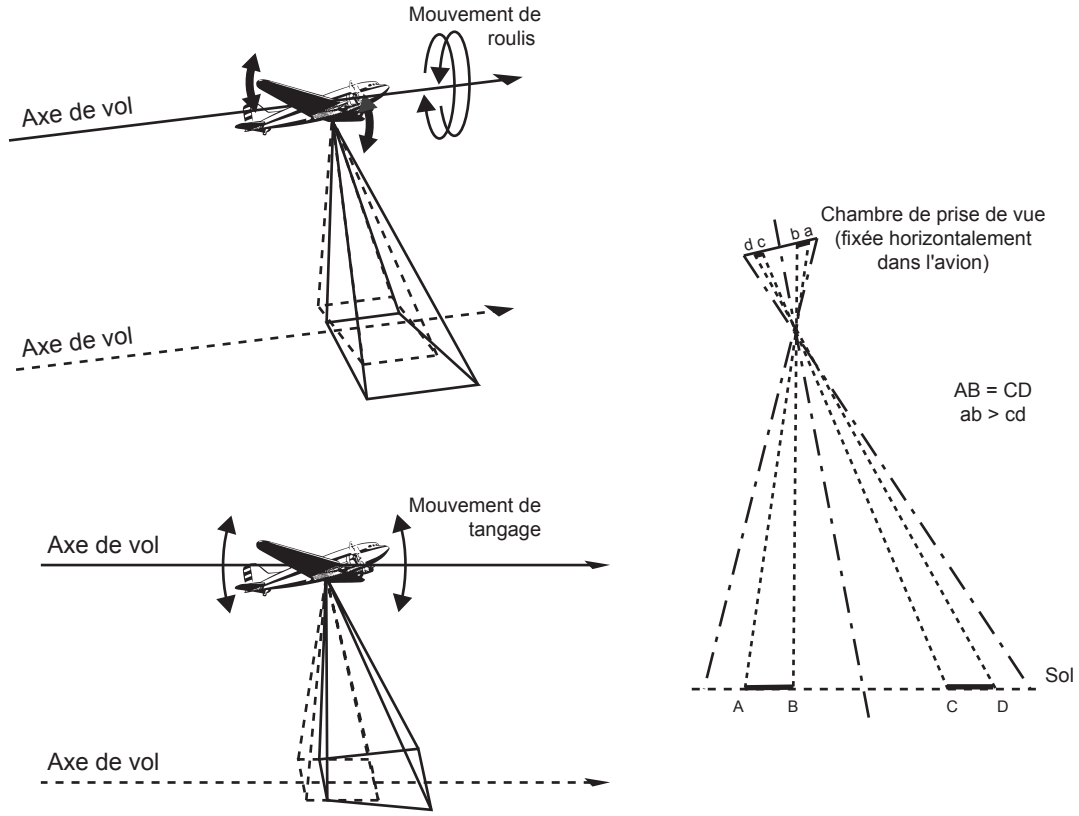


Figure 2-1
Principe de mesure photogrammétrique par stéréoscopie sur un restituteur numérique en fonction de la parallaxe linéaire (Px)

exprime en terme de roulis, tangage, et lacet. Le roulis correspond à l'oscillation de l'avion par rapport à l'axe de vol (les bouts des ailes ont un mouvement d'oscillation), tandis que le tangage représente un mouvement autour d'un axe transversal (le nez et la queue ont un mouvement d'oscillation). Le lacet représente un mouvement autour d'un axe vertical et traduit le fait que la trajectoire de l'avion n'est pas parfaitement rectiligne (**Cf. Fig 2-2**). Le tangage et le roulis conduisent à une visée oblique et à une variation d'échelle sur la photographie, alors que le lacet n'induit qu'une variation de l'orientation de la photographie.

La présence d'un fort relief engendre des déformations significatives qui sont en fait des différences d'échelles entre une zone plus proche et une zone plus éloignée de la prise de vue. Même lorsque le terrain semble plat, il n'est pas strictement parallèle à la photographie du fait de la rotondité de la terre.

Tangage et roulis: entraînent une translation et un changement d'échelle de l'image



Lacet: entraîne une rotation de l'image

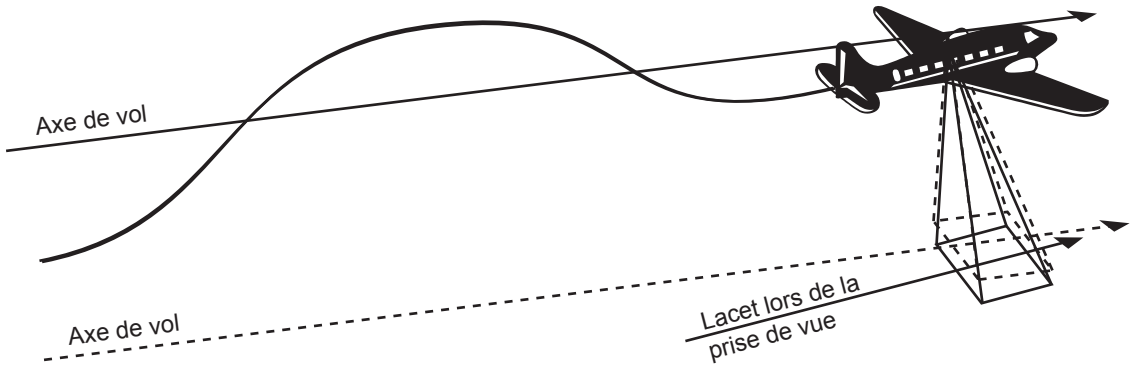


Figure 2-2
Rotations de l'engin de vol en terme de roulis, tangage et lacet, et les déformations engendrées sur les prises de vues

L'effet de la rotondité de la terre reste cependant négligeable pour des prises de vues distantes de quelques kilomètres.

Pour les appareils de prise de vue qui utilisent des optiques, les défauts de lentilles des objectifs et de planéité du négatif introduisent des distorsions optiques. Les distorsions radiales peuvent être corrigées à l'aide des marques de fond de chambre (appelées aussi marques fiduciaires) et du certificat de calibration de l'objectif, contemporain à la prise de vue.

La correction des distorsions et l'obtention du modèle s'effectuent selon trois phases successives d'orientations appelés en photogrammétrie :

- "l'orientation interne",
- "l'orientation relative",
- "l'orientation absolue".

"L'orientation interne" consiste à corriger les distorsions de la photographie que nous avons vues ci-dessus, à l'aide du certificat de calibration qui indique les coordonnées des marques de fond de chambre et des centres optiques de l'objectif et du cliché, des coordonnées de la prise de vue, des angles de roulis, de tangage et de lacet.

"L'orientation relative" est une phase très importante de la modélisation car elle va permettre de positionner les photos l'une par rapport à l'autre, ce qui va avoir une conséquence directe sur la qualité du modèle permettant de supprimer la parallaxe y entre les deux clichés (**Cf. Fig. 2-1**). Cela nécessite six points (cinq pour effectuer les calcul et un sixième pour calculer les résidus permettant une estimation de la qualité du modèle) connus dans le repère x, y de chaque photographie que l'on nomme "points de parallaxe". Ces points de parallaxe doivent être répartis au mieux dans la bande de recouvrement commune aux deux photographies, qui est généralement de 60 à 70% pour les missions aériennes classiques (**Cf. Fig. 2-3**).

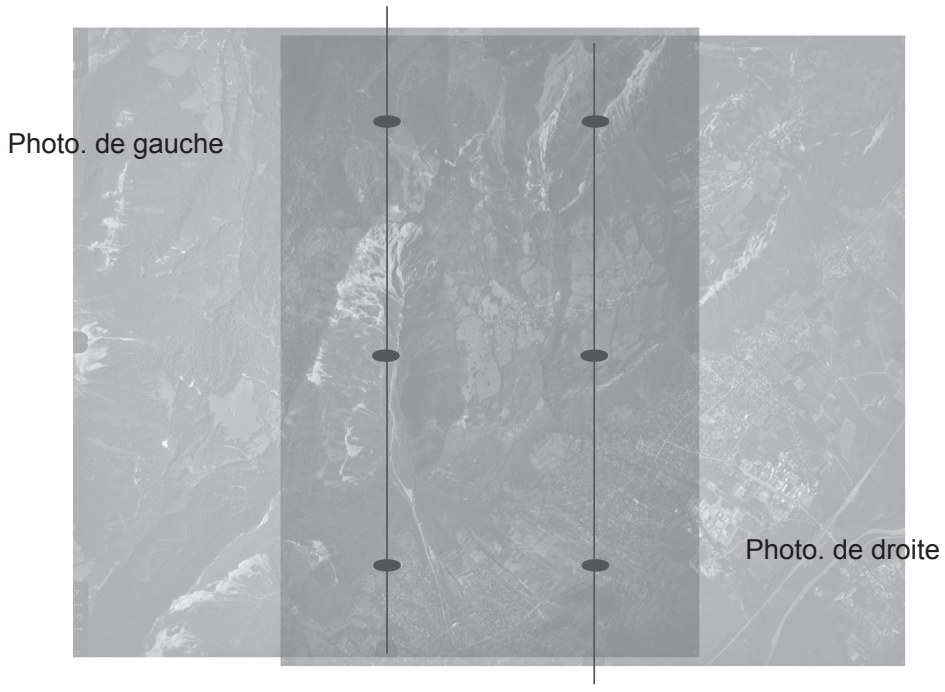


Figure 2-3
Répartition des points de parallaxe sur la bande de recouvrement d'un couple de photographie du bassin versant du Manival, permettant l'élaboration de l'orientation relative (chaque point de parallaxe doit pointer le même objet sur chacune des deux photographies)

Enfin, "l'orientation absolue" n'est pas absolument nécessaire : elle consiste en un géoréférencement dans un repère connu. Pour placer les coordonnées dans un système de repérage connu, en théorie, trois points de coordonnées X, Y, Z bien répartis au niveau de la zone d'étude suffisent. En pratique toutefois, on prend plus de points, certains n'étant parfois utilisés que pour leurs coordonnées planimétriques ou alors altimétriques en fonction de la précision obtenue sur les résidus du modèle. De plus, de nombreux logiciels, dont *Poivillier E.*, regroupent les deux dernières phases alors nommées "orientation globale" ou "orientation externe".

1.1.3. Précisions des mesures en photogrammétrie

Différents éléments sont à prendre en compte pour définir la précision des mesures de photogrammétrie [Slama, 1980 ; Lane *et al.*, 1993 ; Fryer *et al.*, 1994 ; Brasington *et al.*, 2003] :

- l'échelle globale de l'image ;
- la résolution du support de l'image ;
- la résolution et la qualité de l'image numérisée ;
- la qualité du modèle et le choix d'un calage absolu ou relatif ;
- et surtout la qualité et la précision des pointés de l'opérateur.

L'échelle globale de la photographie est directement liée à la distance de prise de vue. Ainsi les vues aériennes au 1/30 000^{e} ont été effectuées à une altitude d'environ 5 000 mètres, celles au 1/3 000^{e} à environ 1 500 mètres. Mais la focale de l'objectif intervient également et pour des altitudes allant de 4 000 à 5 000 mètres, on peut obtenir des échelles variant de 1/15 000^{e} à 1/30 000^{e}. Dans tous les cas, l'échelle influence le degré de précision, puisque la surface que représente un pixel lui est directement liée.

La qualité de l'image, et notamment le support, modifie la résolution de la photographie. Ainsi les films offrent une résolution deux fois supérieure aux tirages papiers. La taille du grain sur film varie de quelques microns à 30 microns selon la sensibilité du film, le type d'émulsion et la qualité de l'optique utilisée. Il est donc inutile de scanner des tirages papiers à plus de 1200 dpi (*dot per inch*). La mesure dpi signifiant points ou pixels par pouce, la conversion d'une unité de mesure en micron, généralement plus utilisés en photographie, s'effectue avec la formule suivante où 1 pouce vaut 25,4 mm :

$$\text{Résolution en micron} = \frac{25{,}4 \text{ X } 1000}{\text{Résolution en dpi}} \qquad (2\text{-}1)$$

Une résolution à 15 microns correspond donc à une résolution proche de 1700 dpi. A cette résolution, pour une échelle au 1/30 000^{e}, le pixel (ou le grain de la photographie) correspond à un carré de 45 cm. de côté, alors que pour une échelle au 1/20 000^{e}, elle est de 30 cm.

Pour utiliser la restitution numérique, il faut numériser les images. Deux problèmes se posent alors : le choix de la résolution et le choix du matériel. La résolution de l'image numérisée doit correspondre à la résolution du support utilisé, comme nous l'avons déjà vu ci-dessus, mais aussi aux besoins de l'étude en terme de précision. Bien entendu, meilleure est la résolution, plus les fichiers informatiques d'image seront volumineux. Concernant le matériel, il faut savoir que les scanners classiques engendrent des déformations aléatoires. Pour des images de grande précision, il est donc préférable d'utiliser un scanner métrique (ou à rouleaux) [Gruber et Leberl, 2001].

La qualité du modèle est bien évidemment directement conditionnée par la précision des mesures, voire sur la possibilité de les effectuer. En effet, comme nous l'avons expliqué ci-dessus, si l'orientation relative n'est pas bonne, la parallaxe y ne sera jamais annulée et on ne pourra donc jamais superposer le même point sur les deux photos afin d'obtenir sa coordonnée (**Cf. Fig. 2-1**). Suivant les études, l'orientation absolue n'est pas toujours nécessaire. En effet, si le but de l'étude est uniquement de comparer deux couples de photographies à deux dates différentes, les coordonnées des points mesurés ne doivent pas nécessairement être connues avec précision dans un référentiel défini (Lambert, WGS,…). Dans le cas contraire, la qualité de l'orientation absolue intervient dans la précision des résultats. Elle est directement liée à la précision des coordonnées des points de calage et à la précision du pointé de ces points sur les photographies. Le logiciel indique les résidus, c'est à dire les écarts entre les coordonnées des points ayant servi à la modélisation et le modèle. Cette information est un indicateur de la qualité du modèle.

D'un point de vue théorique, l'imprécision de pointé de l'opérateur, qui peut être extrêmement variable d'un individu à l'autre, est une erreur très difficile à quantifier, à moins d'effectuer une série de pointages sur des points dont les coordonnées ont été par ailleurs mesurées sur le terrain. Il faut tout d'abord savoir qu'une part importante de la population ne voit pas ou assez mal en trois dimensions. Ensuite, il est très difficile pour un opérateur inexpérimenté d'effectuer un pointé précis et surtout avec constance. Seuls les photogrammètres expérimentés excellent dans ce domaine avec une imprécision de l'ordre de quelques microns [Fryer *et al.*, 1994] et une rapidité de mesure qui peut atteindre plusieurs centaines de points par heure. Pour notre part, nous nous sommes rapprochés du bureau d'étude *Sintégra*, cabinet de géomètres-experts ayant une très grande expérience en photogrammétrie, afin d'acquérir les concepts et la méthodologie de base qui nous ont permis d'effectuer les mesures par nous-mêmes sur le restituteur *Poivillier E*. Certains levés ont toutefois été mesurés au bureau d'étude *Sintégra* sur un restituteur numérique Leica, avec l'aide d'un photogrammètre professionnel. Par la suite, la qualité des résultats a été analysée en comparant les mesures à des points fixes connus sur le terrain comme la crête de certains barrages "RTM"; ce qui a montré une bonne qualité de l'ensemble des mesures.

1.1.4. Application méthodologique aux photographies aériennes d'archives du Manival

La technique photogrammétrique telle que nous l'avons développée précédemment a été utilisée au Manival, sur des couples stéréoscopiques de photographies aériennes d'archives recensées dans le **tableau 2-2**. Le couple de 1993 a été retenu comme référence pour le calage de tous les autres couples, permettant une comparaison altimétrique de meilleure qualité ; de plus, l'étape de géoréférencement n'est alors pas nécessaire. Parmi les différentes dates disponibles, le couple de 1993 présentait la meilleure qualité pour les raisons suivantes :

- Leur échelle est moyenne (1/15 000^{e}) par rapport aux autres couples de photographies disponibles sur la zone d'étude ;
- Les prises de vues sont verticales permettant une meilleure précision et une facilité d'utilisation par rapport aux prises de vues obliques ;
- La totalité du bassin versant étudié est visible sur un seul couple de photographies, il n'y aura donc qu'un seul modèle de calage ;
- La date de prise de vue est assez récente ce qui implique une meilleure qualité et permet aussi de voir sur les photographies plus de points mesurables actuellement sur le terrain ;
- Le faible degré de remplissage sédimentaire du chenal laisse voir la quasi totalité des barrages "RTM" dont très peu étaient enfouis sous les matériaux, leurs crêtes présentant autant de points fixes utiles pour le calage du modèle photogrammétrique, ou pour vérifier et améliorer la qualité des mesures.

Tableau 2-2
Clichés utilisés pour l'étude diachronique du torrent du Manival

Année	Date	Echelle moyenne	Nombre de couples	Prise de vue	Origine
1963	26 février	1/30 000^{e}	1	A.V.	IGN
1970	13 août	1/15 000^{e}	1	A.V.	IFN
1975	28 octobre	1/30 000^{e}	1	A.V.	IGN
1981	29 juillet	1/15 000^{e}	2	A.V.	IFN
1984	18 octobre	1/17 000^{e}	1	A.V.	IGN
1985	26 octobre	1/10 000^{e}	1	A.V.	CGE Sintégra
1987	30 août	1/30 000^{e}	1	A.V.	IGN
1989	30 août	1/30 000^{e}	1	A.V.	IGN
1993	juillet	1/15 000^{e}	1	A.V.	IFN
1996	22 juillet	1/30 000^{e}	1	A.V.	IGN
1998	30 juillet	1/25 000^{e}	1	A.V.	IGN
2000	avril	1/3 000^{e}	3	A.O.	CGE Sintégra

A.V. : Prises de vue aériennes verticales,
A.O. : Prises de vue aériennes obliques,
IGN : Institut Géographique National,
IFN : Inventaire Forestier National,
CGE : cabinet de Géomètre-Expert.

Dans les paragraphes qui suivent, les étapes de la mise en place de ce couple de référence ont été décrites, puis nous avons expliqué comment le calage des autres couples a été mené, avant d'étudier et d'améliorer la précision des mesures.

A. Mise en place du couple photographique de référence (1993)
Documents de référence

Le bassin versant du Manival est couvert par deux photographies aériennes prises en juillet 1993 lors d'une mission pour l'Inventaire Forestier National (IFN). Elles ont une échelle globale d'environ 1/15 000e. Pour obtenir une meilleure précision nous avons utilisé les Contre Types Positifs (films) achetés auprès de l'IGN, qui ont une résolution deux fois supérieure par rapport aux tirages papier.

Ces films ont été scannés sur un scanner à rouleaux qui, par sa précision, limite les distorsions et a permis de numériser les photographies à une résolution de 15 microns, soit environ 1700 dpi. Etant donnée l'échelle moyenne de 1/15 000e, un pixel représente alors une surface carrée sur le terrain d'environ 23 cm. de côté. Chaque photographie aérienne de format 23 X 23 cm. représente ainsi un fichier numérique d'environ 230 Mo.

Mode opératoire de photogrammétrie : orientation interne

Pour corriger les distorsions internes des photographies, le logiciel utilise :

- les informations du fichier caméra (extension *.cam*) provenant du certificat de calibration de l'objectif photographique,
- les marques de fond de chambre situées aux quatre angles et généralement au milieu des quatre bords de la photographie.

Le fichier caméra comprend les coordonnées du centre optique et la focale en mm, éventuellement les 3 coefficients de distorsion, le nombre de repères de fond de chambre et leurs coordonnées en mm (**Cf. Fig. 2-4**).

Fichier M93.cam

```
 0.014      0.003      153.03
 0          0          0
 8
  105.998  -106.003
 -106.000    106.003
 -105.995    106.000
  106.003    106.006
    0.001  -109.998
 -109.998     -0.004
    0.006    110.000
  109.991      0.005
```

Figure 2-4
Fichier caméra (.cam) comprenant les coordonnées du centre optique (XC, YC, et focale P en mm), les 3 coefficients de distorsion, le nombre de repères, et les coordonnées des repères de fond de chambre en mm

Les huit marques de fond de chambre sont pointées successivement à l'écran. Le calcul est automatique, puis à la fin de chaque cliché l'écart type d'application est affiché. Ce dernier donne un ordre de grandeur de l'erreur concernant "l'orientation interne", qui doit être inférieure à un pixel. Dans le cas contraire la cause de l'erreur provient bien souvent d'une faute de mesure : mauvais pointé, défaut de géométrie du scanner, ou mauvaise introduction des coordonnées dans le fichier caméra. La **figure 2-5** montre que le résultat de l'orientation interne est acceptable.

Orientation des images et mesure des points d'appui : orientation externe

Le logiciel se charge des "orientations relative et absolue" en une seule phase ("orientation globale ou externe") permettant ainsi d'effectuer la mesure des points de parallaxe (de coordonnées inconnues) et des points d'appui (connus par leurs coordonnées terrain) de manière identique.

Bien que le géoréférencement (orientation absolue) ne soit pas indispensable puisque l'objectif est seulement de comparer différents couples de manière relative, nous avons fait le choix de placer toutes

Fichier M93.mdl

```
***1993ref***

Points mesurés     :                17               Précision planimétrique (m):       1.000
Points plani       :                 1               Précision altimétrique  (m):       1.000
Points alti        :                10               Précision cliché   :               0.010
Points plani+alti  :                 2               Tolérance d'élimination :          3.000

Coordonnées cliché des points mesurés:
       2     109.163    17.860         44.777    18.370
       4      37.463    16.484        -33.881    18.262
       3      67.659    10.867         -0.484    12.084
       8       5.196   -36.641        -78.303   -34.202
       7     -24.673    64.689       -105.696    67.866
       6      33.935    62.145        -41.628    64.380
       5      97.855    29.122         31.495    29.944
      .1       3.616    89.458        -72.137    92.401
      .2      75.009    91.370         15.356    93.113
      .3      85.200   -78.358         -0.460   -77.343
      .4      13.874   -75.895        -68.101   -73.515
       9     -13.210    17.571       -109.897    20.583
      10      19.887    21.043        -54.791    23.175
      13      20.517    20.765        -54.063    22.897
      11      14.701    17.909        -61.425    20.149
      12      29.453    19.676        -43.203    21.617
      35      23.156    20.048        -50.733    22.110
Taille du pixel      0.312
Taille du pixel      0.312
Compensation complète
Sigma0 :      0.836
Sigma0 :      0.834
Sigma0 :      0.834
Elimination des fautes: Aucune faute éliminée
Coordonnées compensées
       2          874321.85      335953.44         581.59
       4          874052.75      337741.63         887.99
       3          874022.95      337004.28         743.50
       8          872923.53      338347.58        1325.33
       7          874780.91      339126.86        1291.26
       6          874944.40      337967.46        1103.74
       5          874530.78      336323.52         691.39
      .1          875421.50      338645.71        1118.35
      .2          876128.25      336869.30         371.24
      .3          872327.95      336789.71        1387.99
      .4          872169.85      338091.71        1248.59
       9          873856.56      338770.19        1738.38
      10          874085.89      338153.04        1031.43
      13          874082.38      338138.79        1027.34
      11          874001.23      338258.99        1087.19
      12          874093.28      337934.76         946.69
      35          874078.00      338077.86         998.40
-------------------------------------------------------------------------------
Résidus de la compensation
      .4    -0.000   0.000     -0.000  -0.000        ---        ---        ---
      .2    -0.000  -0.000      0.000   0.000        ---        ---        ---
      .1    -0.000  -0.001      0.000   0.001        ---        ---        ---
      .3    -0.000   0.002     -0.000  -0.002        ---        ---        ---
       5    -0.000   0.000     -0.000  -0.000        ---        ---      -0.30
       9     0.000   0.001     -0.000  -0.001        ---        ---      -0.38
      13    -0.000  -0.004      0.000   0.004        ---        ---       0.54
       3     0.000  -0.006      0.000   0.006       0.39      -0.26        ---
      12     0.000   0.001     -0.000  -0.001        ---        ---       0.62
       2    -0.000   0.004     -0.000  -0.004        ---        ---      -0.62
       4    -0.000  -0.000      0.000   0.000      -0.68       0.06      -0.39
      35     0.000   0.002     -0.000  -0.002        ---        ---       0.95
       6     0.000   0.001     -0.000  -0.001        ---        ---      -1.09
       7     0.000   0.004     -0.000  -0.004       0.41       0.32      -1.21
      10     0.000   0.002     -0.000  -0.002        ---        ---       1.72
       8     0.000  -0.002      0.000   0.002        ---        ---      -1.76
      11    -0.000  -0.005      0.000   0.005        ---        ---       2.10
  Sigma                    Parallaxe   0.006       0.51       0.24       1.13
-------------------------------------------------------------------------------
Sommets
   873574.95   338555.07     4220.28         873750.19   336981.44     4225.41
Rotations
    0.109846   -0.993869    0.012610          0.126596   -0.991933    0.006577
    0.993909    0.109946    0.007541          0.991954    0.126596   -0.000373
   -0.008881    0.011705    0.999892         -0.000463    0.006571    0.999978
```

Figure 2-5
Le fichier modèle de base (.mdl) utilisé pour la mission de 1993. Il est important de regarder les écarts (résidus en mètres) sur les points utilisés, qui sont un indicateur de l'erreur (en gras)

les coordonnées dans un référentiel connu (Lambert III) ; ainsi une éventuelle utilisation ultérieure de ce travail dans le cadre d'autres recherches en serait facilitée. Les coordonnées terrain des points d'appui ont été regroupées dans le fichier appui d'extension *.app*. Les coordonnées ne sont pas forcément complètes et un code de 1 à 3 correspond respectivement à un point de coordonnée altimétrique seulement, un point de coordonnées planimétriques seulement, ou un point de coordonnées planimétriques et altimétrique. En théorie trois points suffisent, mais nous en avons utilisés bien plus

Fichier M93.app

1	3	874584.600	335319.162	494.088
2	1	874320.423	335950.360	580.973
3	2	874023.338	337004.022	742.114
4	3	874052.076	337741.686	887.600
5	1	874536.690	336324.423	691.087
6	1	874943.627	337969.541	1102.645
7	3	874781.327	339127.177	1290.058
8	1	872928.590	338346.478	1323.573
9	1	0.000	0.000	1738.000
10	1	0.000	0.000	1033.143
11	1	0.000	0.000	1089.290
12	1	0.000	0.000	947.302
13	1	0.000	0.000	1027.881
22	1	0.000	0.000	1072.002
31	1	0.000	0.000	1002.492
24	1	0.000	0.000	1066.530
29	1	0.000	0.000	1045.375
27	1	0.000	0.000	1056.742
35	1	0.000	0.000	999.343
841	1	872834.100	336731.500	1448.100
842	1	874086.700	338152.600	1031.800
843	3	874859.000	338127.800	1136.100
844	2	874693.300	337040.300	1226.500
845	2	874212.100	336092.000	600.400
846	3	874051.200	336960.700	738.800
847	2	874053.600	337741.300	887.200

Figure 2-6
Fichier des points d'appui (.app) comportant le numéro du point, son code (altimétrique et/ou planimétrique), et ses coordonnées X, Y et Z

(**Cf. Fig. 2-6**), ce qui nous a donné une plus grande souplesse pour améliorer la qualité théorique du modèle. Parmi ces points, 7 d'entre eux (numéros 2 à 8), bien visibles sur les photographies, ont été localisés sur le terrain par DGPS (Differential Global Positioning System).

Le système GPS est un système de positionnement par satellites qui utilise la constellation de satellites NAVSTAR. Il a été mis en service en 1973 par le ministère de la défense des Etats-Unis d'Amérique qui en est le propriétaire. Les satellites en orbite envoient des messages à des récepteurs, les antennes GPS, qui peuvent les enregistrer. En analysant ces messages, le positionnement du récepteur peut être calculé à partir des positions des satellites. Ce mode de positionnement est assimilable à de la triangulation dans l'espace [Gili *et al.*, 2000]. Pour les levés, nous avons utilisé un premier récepteur comme station permanente qui a enregistré les données en continu (GPS Dassaut), et un second récepteur mobile avec lequel les différents points ont été mesurés en stationnant sur ces derniers entre 10 et 20 minutes (**Cf. Fig. 2-7**). Ils ont été sélectionnés autour du bassin versant et dans le chenal du Manival afin d'obtenir une bonne répartition dans l'espace étudié (**Cf. Fig. 2-8**). Les données des récepteurs sont rattachées, par post-traitement, à un réseau de mesure fixe permanent, qui permet d'obtenir les coordonnées des points mesurés avec une précision centimétrique dans un repère connu et unanimement utilisé en France (canevas géodésique traditionnel NTF "Nouvelle Triangulation de la France") : Lambert III suivant l'ellipsoïde de Clarke 1880 (**Cf. Tab. 2-3**). Les altitudes absolues, conformément au canevas national de nivellement (IGN69), se réfèrent au niveau moyen de la mer méditerranée au marégraphe de Marseille [Delorme, 1999]. Les cinq autres points d'appui (numéros supérieurs à 8) sont des points altimétriques, également du canevas national de nivellement (IGN69) ou de barrages torrentiels "RTM" connus qui contribuent à améliorer la qualité altitudinale du modèle ; l'altitude étant l'axe le plus sensible aux imprécisions et aux erreurs du modèle à cause du fort relief.

Figure 2-7
Mesures DGPS (Differential Global Positioning System) sur le secteur du Manival. A gauche, la station "permanente" et à droite, le récepteur mobile (Clichés S.V-C.)

Tableau 2-3
Coordonnées des points mesurés par GPS différentiel sur le terrain (Lambert III, ellipsoïde de Clarke 1880)

Points de mesure	X	Y	Z
0 (antenne fixe)	874584.600	335319.162	494.088
1	874320.423	335950.360	580.973
2	874023.338	337004.022	742.114
3	874052.076	337741.686	887.600
4	874536.690	336324.423	691.087
5	874943.627	337969.541	1102.645
6	874781.327	339127.177	1290.058
7	872928.590	338346.478	1323.573

Les points de parallaxe et d'appui sont pointés par stéréoscopie à l'écran en annulant les écarts sur l'axe x et sur l'axe y. Dans le fichier modèle d'extension *.mdl*, les points de parallaxe uniquement dédiés à l'orientation relative ont des numéros précédés d'un point. Les autres numéros correspondent aux points d'appui permettant l'orientation absolue ; mais ils sont également utilisés comme points de parallaxe par le modèle pour le calcul de l'orientation relative. La qualité de l'orientation relative est estimée par les résidus de parallaxe qui doivent être inférieurs à la taille d'un pixel, ce qui se vérifie nettement dans notre cas (**Cf. Fig. 2-5**). Puis, à l'issue du calcul final d'orientation globale, les résidus de mesure sur les points d'appui donnent un ordre de grandeur du degré de précision du modèle dans les trois dimensions spatiales X, Y, et Z du système de repérage Lambert III. Lorsque ces résidus sont trop forts, il faut reprendre la phase de modélisation en éliminant les moins bonnes coordonnées des points d'appui. Nous avons été amenés à réitérer cette étape de nombreuses fois. Finalement, pour la modélisation du couple de 1993 ces valeurs sont respectivement de 51 et 24 cm en planimétrie et de 1,13 mètre en altimétrie (**Cf. Fig. 2-5**).

Une fois que le modèle a été mis en place et que sa précision théorique (résidus) a été validée, il a alors été possible de passer à la phase d'exploitation, c'est-à-dire de mesure des coordonnées tridimensionnelles en Lambert III. Le logiciel contient des options qui peuvent être très utiles pour la comparaison de différents couples de photographies tels que l'injection de points ou de tracés en stéréoscopie, ou le suivi d'un parcours prédéfini (Cf. Manuel d'Anaglihr Poivillier E. en annexe)

☆ Antenne GPS fixe

⊕ Points de parallaxe supplémentaires

★ Points mesurés par DGPS

△ Points "altitudinaux" supplémentaires

Figure 2-8
*Localisation des points ayant permis le calage du couple photographique de référence (1993)(**Cf. Fig. 2-5**) pour les mesures photogrammétriques du bassin versant du Manival (en trait noir)*

D. Calage des autre couples diachroniques sur celui de 1993

Pour tous les couples stéréoscopiques, les mêmes étapes présentées ci-dessus pour le couple de 1993 permettant de mettre en place le modèle ont été suivies, soit 15 calages au total pour le bassin du Manival (**Cf. Tab. 2-2**). La seule différence concerne les points d'appui qui n'ont pas été mesurés sur le terrain mais directement sur les photographies de 1993. A chaque couple a été attribué un panel de points de référence (15 à 20), bien visibles sur les photographies, dont les coordonnées X, Y, Z en Lambert III ont été mesurées sur le couple de 1993.

Ce choix méthodologique est justifié pour les deux raisons principales suivantes :

- D'une part, les points d'appui mesurés en 2001 par DGPS ne sont pas forcément apparents et identiques sur toutes les missions, en particulier les plus anciennes, du fait des changements intervenus au sein du bassin versant (disparition de chemins, couverture végétale, degré de remblaiement du chenal, apparence des ouvrages "RTM",…).
- D'autre part, dans le cadre d'une analyse diachronique, il nous est apparu préférable de comparer tous les couples de photographies à un unique couple de référence, 1993, rendant la modélisation relative plus précise. Comme le montre la **figure 2-9**, si les différents couples photographiques avait été calés par rapport à la référence du terrain réel, le risque d'erreur aurait pu être, en certains endroits, deux fois plus important.

Donc même si les résultats sont moins proches de la réalité topographique du terrain, le système de référence au couple de 1993 permet une meilleure comparaison relative entre les différentes missions. La dernière phase d'orientation absolue (géoréférencement) n'était pas obligatoire, nous l'avons cependant réalisée pour placer l'ensemble des résultats dans un système de repérage auquel les utilisateurs sont habitués.

Pour résumer, nous avons donc opéré en trois étapes :

1. Construction du modèle pour l'année 1993 à l'aide des points GPS bien répartis sur la zone d'étude (modèle permettant l'annulation des parallaxes et géoréférencement en Lambert III).
2. Validation de ce modèle de 1993 par une étude statistique des résidus du modèle par rapport aux points de calage (terrain).

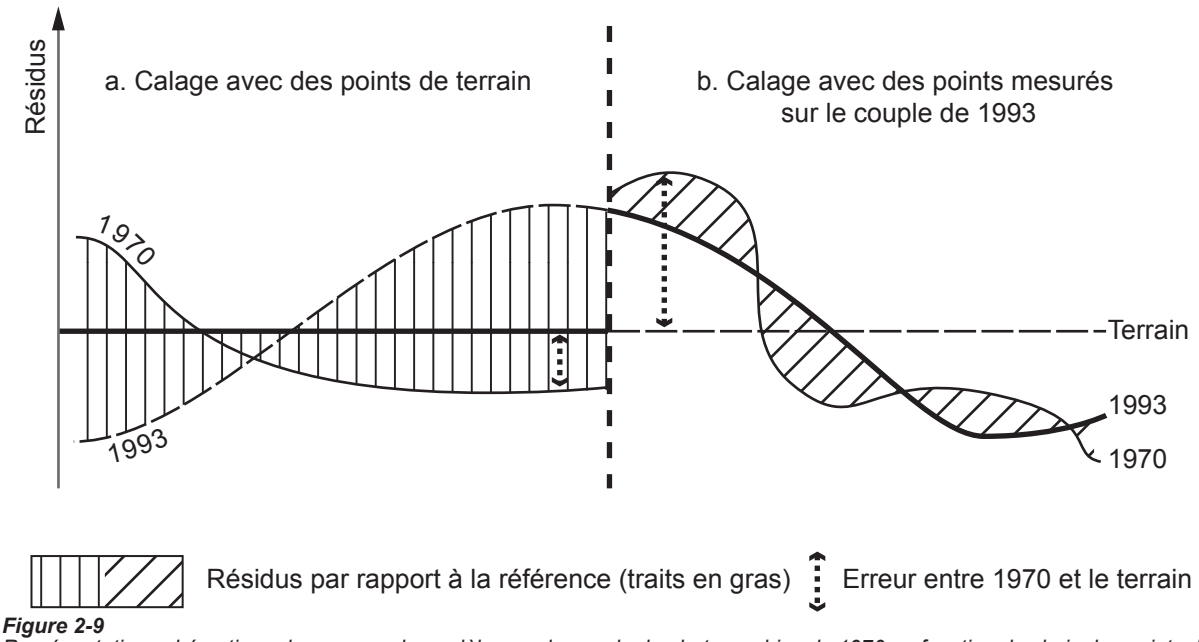


Figure 2-9
Représentation schématique des erreurs du modèle pour le couple de photographies de 1970 en fonction du choix des points de calage : a. avec une référence terrain, b. avec une référence au couple de 1993. Pour notre étude où le but est de comparer deux dates, le cas b. est toujours préférable puisqu'il réduit les erreurs entre dates, même si le cas a. donne un modèle plus proche du terrain

3. Sur les autres photographies, plus anciennes ou de moins bonne qualité, le calage a été fait, non pas par rapport au terrain, mais par rapport au modèle issu du couple de photographies de 1993 (coordonnées en Lambert III également).

C. Estimation de l'erreur de précision sur les photographies du Manival

Il est difficile de calculer précisément l'erreur de mesure, d'autant qu'elle est variable selon la zone de la photographie en fonction de la distance entre les points de calage. Dans un premier temps, la précision de la mise en place des couples stéréoscopiques peut être estimée sur les points d'appui, qui sont en fait des points homologues de couple à couple donc normalement exempts d'erreur de mesure. L'estimateur utilisé est le RMSE (*Root Mean Square Error*) qui est l'écart-type calculé sur les résidus. Il est d'environ 0,65 mètre en moyenne sur tous les couples. Cela veut dire qu'il y a un écart d'environ 0,65 mètre entre deux points d'appui situé de part et d'autre du bassin versant (distance de quelques kilomètres), donc que des mesures dans le chenal (distance de quelques mètres) auront des écarts très faibles, proches de 0. On peut donc considérer qu'il n'y a pas d'erreurs systématiques dans les mesures photogrammétriques. Mais la seule façon de connaître en toute objectivité l'erreur de mesure est de faire une étude statistique comparative entre des mesures effectuées par photogrammétrie et les mêmes mesures effectuées à l'aide d'un autre outil comme le DGPS [Brasington *et al.*, 2003].

En raison du relief c'est la précision en altimétrie qui est la moins bonne, et pourtant c'est cette dimension qui nous intéresse tout particulièrement pour l'estimation de volumes. Il est indispensable de connaître la qualité des mesures altimétriques qui, en travaillant à partir de photographies d'archives, ne peut pas être excellente. L'estimation de l'erreur de mesure peut être calculée d'abord de façon théorique. En toute rigueur, il faudrait observer au microscope le support utilisé pour mesurer la taille d'un grain ou d'une ligne. Dans notre cas, nous avons estimé, suivant les conseils de Michel Mémier (expert en photogrammétrie) et en fonction du certificat de calibration, qu'un millimètre sur le cliché comprenait au maximum 36 lignes (*pair lines*, ou grain ou pixel) étant donné les Contre Types Positifs utilisés, la qualité des tirages (contrastes, luminosité,…), le positionnement de la zone d'étude (centré ou excentré), etc. A titre d'exemple, un appareil moderne va avoir une résolution variant de 140 (centre) à 90 lignes/mm (bordure). Dans un premier temps, il est possible de calculer l'épaisseur d'une ligne, e_l, en mm. :

$$e_l = \frac{1}{36} = 0{,}0277 \qquad (2\text{-}2)$$

La taille d'un pixel est donc estimée à 27,7 µm. Il faut ensuite connaître le rapport de la base sur la hauteur de vol. Il existe deux façons pour calculer ce rapport : soit on utilise directement la hauteur de vol (H_{pv}) qui est d'environ 5 000 mètres et la distance entre les deux prises de vue (B_{pv}) d'environ 3 200 mètres ; soit on peut considérer par un jeu de triangles homothétiques que la focale représente la hauteur de vol (H_{pv}) et que la distance entre le centre des deux photographies du couple représente la base (B_{pv}). Cette dernière correspond à 40% de la longueur du côté de l'image lorsque le taux de recouvrement est de 60%, ce qui est la norme pour de nombreuses missions dont celles de l'IGN par exemple.

$$\frac{B_{pv}}{H_{pv}} = \frac{3200}{5000} = \frac{40\% \text{ de la largeur de la photographie}}{\text{longueur de la focale}} = 0,64 \qquad (2\text{-}3)$$

Le rapport B_{pv}/H_{pv} est donc de 0,64, valeur que l'on retrouve pour la plupart des couples de missions aériennes classiques. Parmi les photographies utilisées, seuls les couples de 2000 dont les prises de vues obliques ont été réalisées d'hélicoptère, ont un rapport d'environ 0,3. Finalement, il est possible de calculer l'erreur de mesure d'altitude (en mm.) selon la formule suivante, en prenant en compte l'échelle moyenne des photographies :

$$\text{Précision verticale} = \frac{1}{\text{échelle}} X \frac{e_l}{B_{pv}/H_{pv}} = 30\,000 X \frac{0,0277}{0,64} = 30\,000 X 0,0433 = 1\,298 \qquad (2\text{-}4)$$

L'échelle 1/30 000^e correspond à l'échelle la moins précise de l'ensemble des photographies utilisées ; l'erreur verticale peut donc être estimée à environ 1,3 mètre.

Ce résultat est un ordre de grandeur théorique, mais il est également possible d'estimer l'erreur des mesures sur des points fixes dont on connaît par ailleurs les coordonnées, et qui n'ont pas servi à l'élaboration du modèle. Le long du chenal du Manival de nombreux seuils artificiels n'ont pas bougé et constituent un réseau de points fixes idéal. Puisque nous avons montré précédemment qu'il n'y avait pas d'erreurs systématiques, l'ensemble des erreurs aléatoires suit une loi normale qui peut être décrite par sa moyenne et son écart type. Nous avons donc fait une étude statistique à partir des points fixes sur les résidus, i.e. en mesurant les écarts en altitudes entre les mesures de toutes les dates et la mesure de référence de 1993. L'erreur de mesure peut ainsi être estimée pour chaque point par l'écart type (RMSE) ; nous aurions donc pu calculer le RMSE pour chaque date malgré le faible effectif, mais puisque la qualité de chaque couple est équivalente, il nous a paru légitime de faire cette estimation directement sur l'ensemble des couples. Sur cette population de plus de 300 individus (mesures aux points fixes) dont l'histogramme se rapproche d'une loi normale (**Cf. Fig. 2-10**), les résultats indiquent une moyenne de -0,18 mètre et un RMSE de 1,15 mètres. Cette valeur correspond bien au résultat théorique précédent. Le RMSE est un estimateur de l'erreur classique en topographie, qui en terme

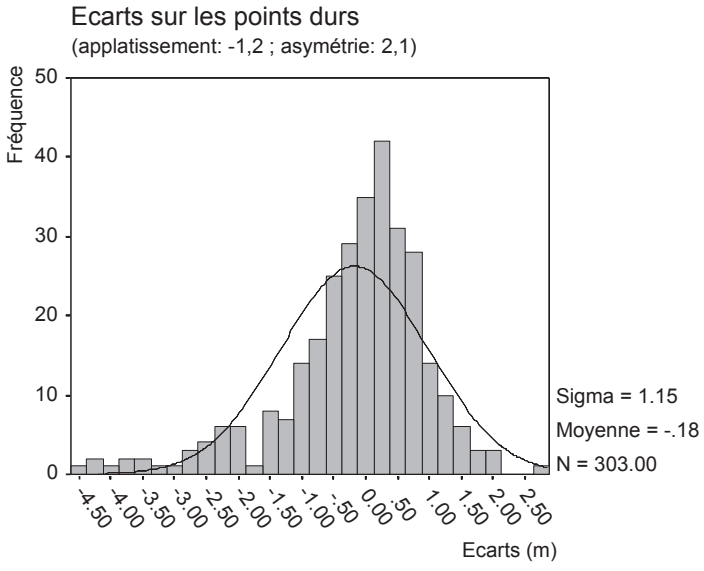


Figure 2-10
Répartition des fréquences sur les écarts de mesure des points durs du profil en long et courbe de Gauss (sigma représente l'écart-type ou RMSE ; et N, l'effectif total)

de probabilité indique que l'on a 68,7% de chance que la valeur soit comprise entre la valeur de la moyenne moins un écart type (RMSE) et la valeur de la moyenne plus un écart type (RMSE).

B. Réduction maximum de l'erreur sur les mesures altitudinales au Manival

Afin de réduire au maximum l'imprécision des mesures prises sur des documents d'archives n'ayant pas toujours une qualité optimum pour notre étude, les données altitudinales ont été corrigées à partir des nombreux points fixes du profil en long, donnant des résultats d'une qualité satisfaisante (**Cf. Fig. 2-11**).

A partir de ces points durs, une courbe de tendance polynomiale d'ordre deux a été calculée par la méthode des moindres carrés pour chaque date. Chacune de ces équations a permis une ultime correction des données d'altitudes mesurées sur les photographies par soustraction de la courbe à tous les points du profil en long mesuré. A titre d'exemple, la **figure 2-12** détaille ces étapes pour le couple de 1998. Le calcul des paramètres statistiques sur les données corrigées montre alors une moyenne nulle et une diminution de l'erreur de l'ordre de 30%, ramenant celle-ci à environ 80 centimètres (**Cf. Fig. 2-11**).

La qualité finale des mesures en altitude obtenue à partir de photographies aériennes d'archives de 1963 à 2000, a un degré d'imprécision sub-métrique ce qui est tout à fait acceptable pour étudier les variations sédimentaires importantes du chenal torrentiel au cours du temps [Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005].

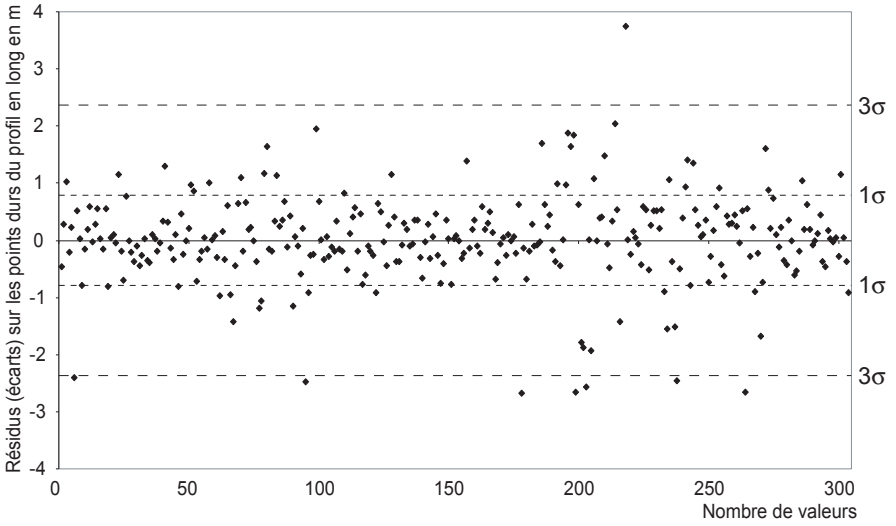


Figure 2-11
Ecarts en altitude des différentes mesures corrigées (par rapport aux mesures de 1993) sur les points durs du profil en long (écart-type = 0,77)

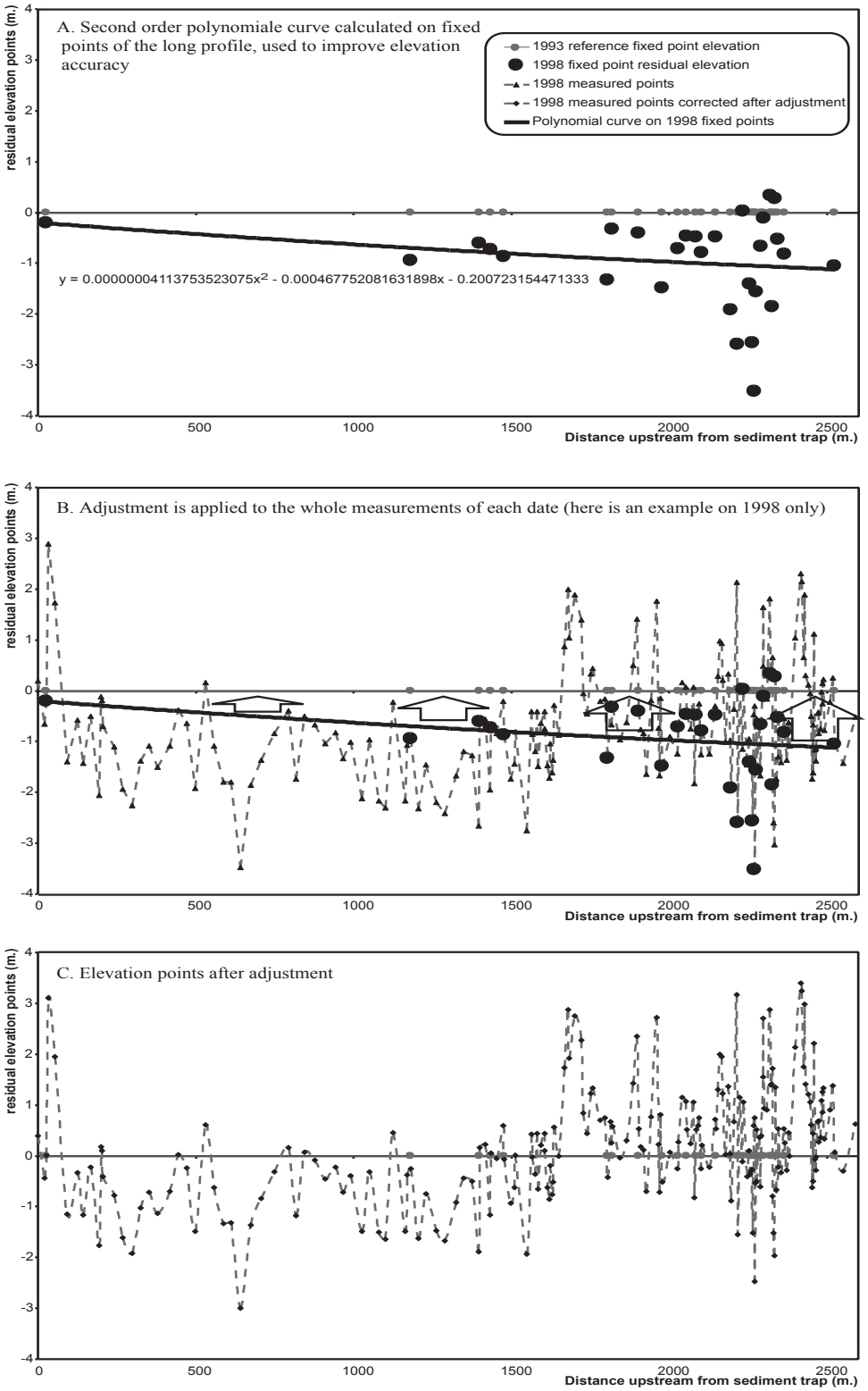


Figure 2-12
Méthode utilisée pour réduire l'erreur altitudinale : exemple des mesures de 1998. Dans un premier temps, une courbe polynomiale est calculée par la méthode des moindres carrés sur les points fixes du profil en long (A) ; ensuite cette courbe permet d'appliquer un ajustement à toutes les valeurs mesurées du profil en long (B) réduisant ainsi l'erreur d'environ 34% (C). La précision des mesures (en écart-type) est alors submétrique (Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005)

1.2. La topographie de terrain par nivellement et cheminement

Les méthodes topométriques classiques s'attachent à mesurer sur le terrain des altitudes et des coordonnées de points [Henry, 2004a]. Ce sont des techniques largement privilégiées en géomorphologie pour comparer des états de surface et quantifier l'évolution des formes dans le temps.

Les coordonnées des points mesurés peuvent servir à l'élaboration de Modèles Numérique de Terrain (MNT). En réitérant les mesures dans le temps, l'analyse diachronique par simple soustraction des MNT constitués est ensuite très rapide. Pour l'étude diachronique, il faut adapter la fréquence des mesures à la vitesse d'évolution du processus étudié, le suivi doit alors bien souvent se poursuivre sur une période de temps assez longue : ces méthodes de mesure de terrain ne sont pas toujours les mieux adaptées. Le MNT peut être représenté par un maillage ou une grille avec des points à chaque intersection nommés "nœuds". La densité de ces nœuds est généralement bien supérieure au nombre de mesures topographiques. Les coordonnées des nœuds du MNT sont donc calculées, par des méthodes mathématiques d'interpolation, à partir des points de mesure, ce qui implique qu'une répartition régulière et en nombre suffisant de ces derniers favorise une meilleure qualité du MNT. L'utilisation des MNT dans les études visant à établir des budgets sédimentaires est alors souvent confinée à des zones de superficie restreinte [Lane *et al.*, 1994 ; Schmidt, 1994].

Sur les cours d'eau, l'échantillonnage topographique a été adapté à leur forme longiligne en se restreignant au profil en long et à des profils en travers équidistants [Brasington *et al.*, 2003]. Pour les grandes rivières, une relation entre la largeur du cours d'eau et la fréquence des formes seuils-mouilles a été montrée, impliquant une équidistance entre les profils en travers de l'ordre de 5 à 7 fois la largeur pour obtenir une bonne représentativité des mesures [Bravard et Petit, 1997 ; Knighton, 1998]. Dans les rivières torrentielles et les torrents, les nombreuses singularités, en particulier les ruptures de pente dans le profil en long liées aux fortes variations de débit, imposent de choisir des profils en travers représentatifs de biefs homogènes [Malavoi et Souchon, 1989 ; Liébaut, 2003].

C'est ce type d'échantillonnage que nous avons utilisé sur le terrain, la difficulté étant de déterminer la répartition et la distance entre les transects. Les paragraphes suivants présentent les outils et techniques de mesure utilisés, ainsi que la mise en place d'un MNT sur l'ensemble du chenal du Manival. Les limites et les contraintes des méthodes utilisées seront particulièrement détaillées.

1.2.1. Matériel utilisé

Les outils généralement utilisés par les géomètres sont les niveaux, en particulier pour les études d'urbanisme qui nécessitent la mise en place de réseaux d'écoulements, les théodolites qui permettent les mesures d'angles, ou les tachéomètres qui combinent théodolite et distance-mètre [Henry, 2004a]. Ces appareils offrent généralement une grande précision des mesures, mais ils sont délicats à utiliser

dans de nombreuses applications géomorphologiques où le terrain est accidenté. Plus récemment, l'utilisation du GPS (Global Positioning System) s'est largement développée pour les mesures topographiques, comme par exemple pour la cartographie de la France. La limite d'utilisation principale de cet outil est le manque d'ouverture au ciel permettant la connexion des satellites, ce qui est fréquent dans les zones boisées ou très escarpées comme les gorges torrentielles. Dans notre cas, les levées topographiques ont été réalisées à l'aide d'un télémètre laser (Impulse LR Laser Technology Inc.) associé à une boussole électronique (Map Star System Laser Technology Inc.), qui peuvent être fixés sur un pied (**Cf. Fig. 2-13**).

Figure 2-13
Matériel de mesure topographique utilisé dans le chenal torrentiel : télémètre laser Impulse et boussole électronique Mapstar sur trépied (Cliché S.V-C.)

Le principe de fonctionnement de cet assemblage est similaire à celui du tachéomètre, mais c'est un rayon laser qui est émis en direction du point dont on recherche la position pour être renvoyé vers l'appareil. Ce dernier mesure et calcule alors :

- la distance directe au point (SD),
- la longueur des projections horizontale (HD) et verticale (VD),
- l'angle de la direction du point mesuré par rapport à l'horizontale (Inc),
- l'azimut de cette direction (Az) (**Cf. Fig. 2-14**).

Des calculs trigonométriques permettent ensuite de retrouver la position dans l'espace des différents points mesurés par rapport à la position de l'appareil ou à une autre référence.

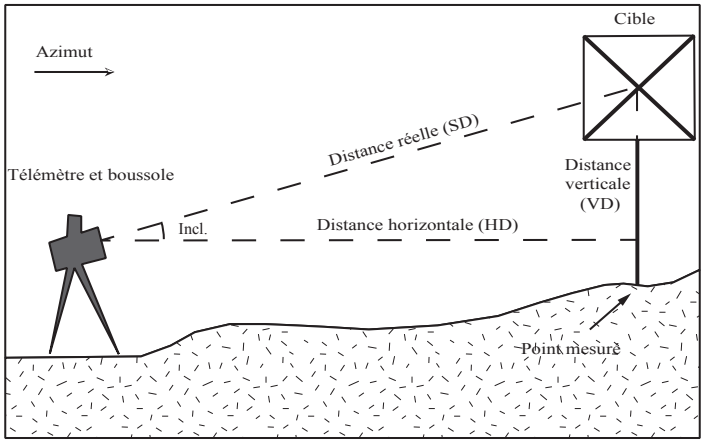


Figure 2-14
Mesures des outils topométriques de terrain utilisés (télémètre laser et boussole électronique)

Ce télémètre permet une visée maximale à une distance de l'ordre de 300 mètres et le constructeur donne une précision de mesure de plus ou moins un centimètre pour une visée à 100 mètres de distance. Cependant, le télémètre est dépourvu de lunette grossissante et les visées lointaines sont donc plus imprécises que les visées proches. S'ajoute à cela l'erreur de mesure liée à la boussole électronique, de l'ordre de plus ou moins 0,3 degré. Toutefois, un test d'utilisation effectué par précaution a donné pour résultat des valeurs plus fortes en particulier pour les distances verticales (plus ou moins 16 cm pour 100 m) et pour l'azimut (plus ou moins 0,7° soit plus ou moins 1 m pour 100 m) à cause de la sensibilité de la boussole [Le Méhauté, 2000]. Il est donc préférable que les visées soient courtes, de l'ordre de 30 à 50 mètres au maximum.

Par comparaison avec le matériel classiquement utilisé en topométrie, l'appareillage utilisé dans cette étude présente deux avantages majeurs pour effectuer des mesures en milieu torrentiel : d'une part, il est léger et son encombrement est faible ; et d'autre part, on peut se passer de prisme réflecteur pour effectuer les mesures. Il n'est donc pas nécessaire d'aller sur la zone où les mesures doivent être faites, ce qui est particulièrement utile dans les zones peu accessibles ou dangereuses (zones particulièrement escarpées et instables, zones soumises à des chutes de pierres).

Une cible d'une hauteur fixe et de forme carré (1 m^2), rayée en son centre par une croix bien visible a souvent été utilisée afin d'assurer un meilleur contrôle de la répartition des points de mesures et de réduire les problèmes d'échantillonnage liés à la précision des appareils ou à la rugosité du terrain. En effet, les faibles erreurs sur les angles aigus peuvent engendrer des écarts de distance bien plus importants ; et la forte rugosité du chenal formée par les blocs ne permet pas toujours une mesure directe (**Cf. Fig. 2-15**).

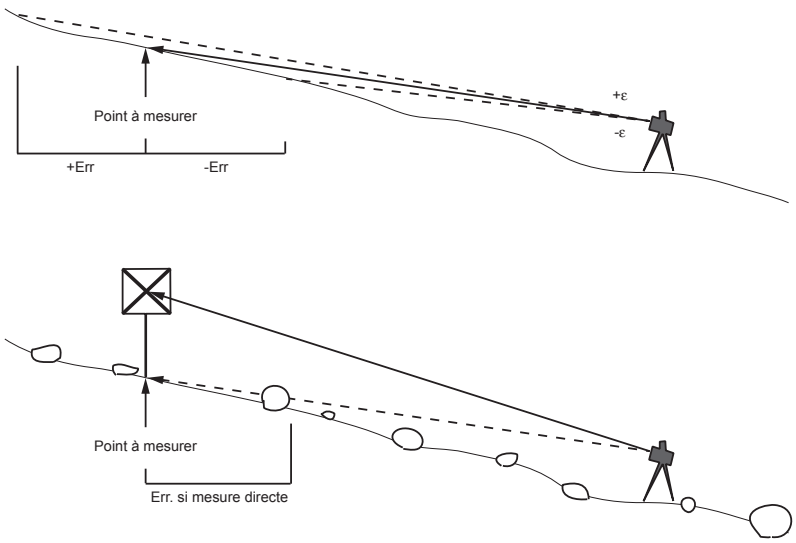


Figure 2-15
Erreurs de mesure en distance (Err) relativement importantes induites par de faibles variations d'angles (ε), en haut ; et en fonction de la rugosité si l'on n'utilise pas de cible réhaussée, en bas

1.2.2. Méthode mise en œuvre : le cheminement topographique

Pour établir la topographie d'un cours d'eau, il est impossible d'effectuer toutes les mesures à partir d'un seul lieu de stationnement, et le déplacement de l'appareil de mesure sur tout le linéaire est obligatoire. On réalise alors un déplacement successif du point de stationnement. En l'absence de points de calage réguliers (bornes IGN, par exemple), il convient de relier les différentes stations par au moins un point de mesure commun afin d'établir, de déplacement en déplacement, la position relative de toutes les zones mesurées. Bien sûr, ces mesures et cette méthode de cheminement donnent une précision des résultats moindre que des levés classiques effectués au théodolite ; elle est cependant beaucoup plus rapide et le levé peut être facilement réajusté à l'aide de quelques points de calage répartis le long du linéaire, tel que des bornes géodésiques, des cotes connues sur les barrages torrentiels, ou des points mesurés par DGPS (Differential Global Positioning System). En principe le cheminement polygonal est composé de "points de canevas" reliés par des visées réciproques (avant et arrière) afin de corriger les erreurs de mesure. Dans notre cas, le cheminement a été simplifié afin d'accélérer la prise de mesures, même si cela réduit leur précision.

Les règles de calculs trigonométriques simples et de changements de repères successifs (translation) nécessaires pour calculer les coordonnées des points mesurés, dans un repère orthogonal ayant pour origine le télémètre, sont (**Cf. Fig. 2-16 a**) :

$$X = HD \,.\, \text{Sin}\,(Az) \qquad (2\text{-}5)$$

$$Y = HD \,.\, \text{Cos}\,(Az) \qquad (2\text{-}6)$$

alors que sur l'axe vertical (nivellement indirect ou trigonométrique), la vue en coupe de la **figure 2-16 b** nous montre que :

$$Z = VD + h_1 - h_2 \qquad (2\text{-}7)$$

Avec

HD : distance horizontale (plan x, y)

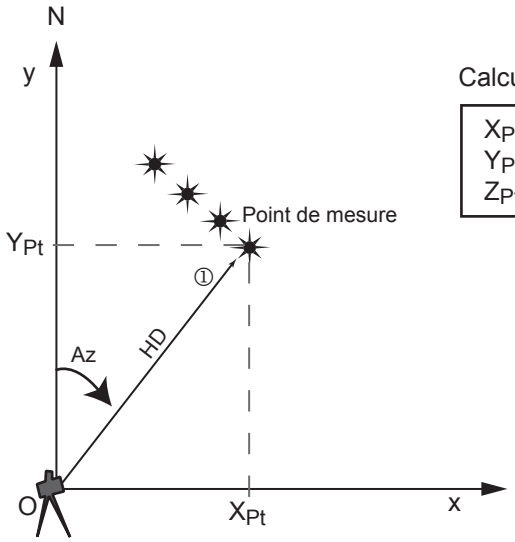
Az : azimut en degré

VD : distance verticale (plan z)

h_1 : hauteur de l'appareil de mesure

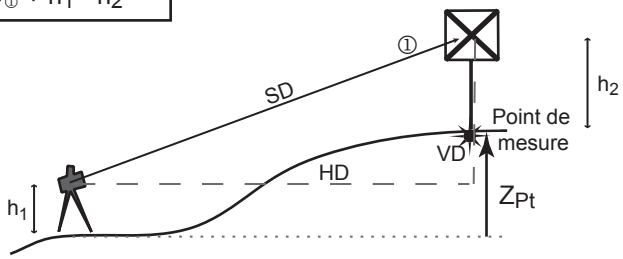
h_2 : hauteur de la mire

Le dernier point de mesure est un point commun à la première visée "avant" et à la seconde visée "arrière", une fois l'appareil de mesure déplacé dans le chenal. Puis une troisième visée "avant" permet de refaire une série de mesure (**Cf. Fig. 2-16 c**). Le point commun sert en fait de pivot et permet d'obtenir les coordonnées des points de toutes les visées "avant" dans le même repère de départ. Si l'on veut éviter de mesurer à chaque station la hauteur de l'appareil de mesure, il suffit de ne pas considérer l'emplacement de ce dernier comme un point de mesure, celui-ci ne servant alors que d'intermédiaire. Il en est de même sur l'axe vertical, et les principes de calculs sont ceux formulés sur la **figure 2-16**, valables pour toutes les visées successives.



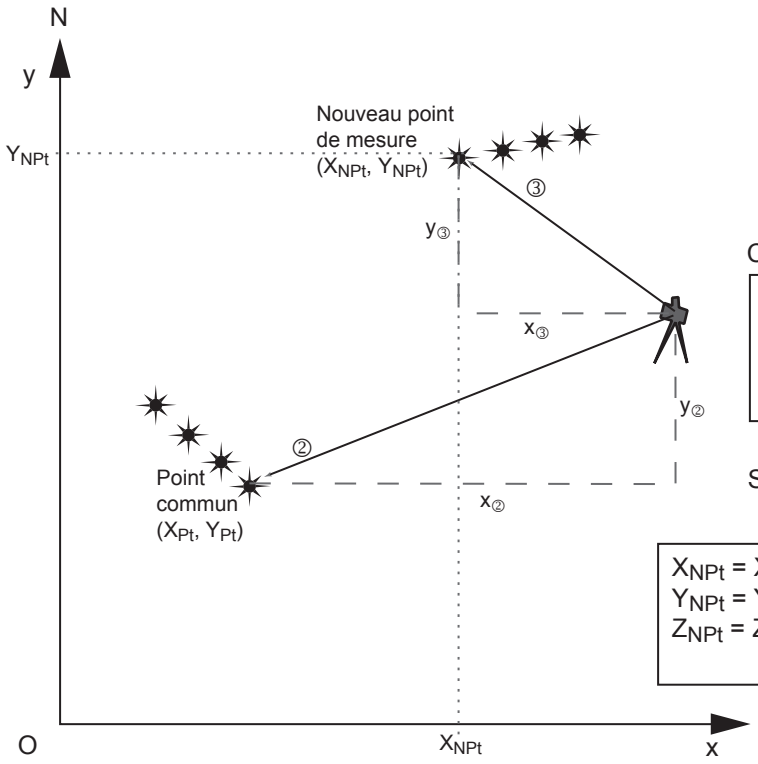
Calculs de coordonnées:

$X_{Pt} = HD_{①} . \sin (Az_{①})$
$Y_{Pt} = HD_{①} . \cos (Az_{①})$
$Z_{Pt} = VD_{①} + h_1 - h_2$



a) Visée avant ① vue en plan (plan x, y)

b) Visée avant ① vue en coupe (plan z)



Calculs de coordonnées:

$X_{NPt} = X_{Pt} - x_{②} + x_{③}$
$Y_{NPt} = Y_{Pt} - y_{②} + y_{③}$
De même dans la dimension verticale,
$Z_{NPt} = Z_{Pt} - z_{②} + z_{③}$

Soit:

$X_{NPt} = X_{Pt} - HD_{②} . \sin (Az_{②}) + HD_{③} . \sin (Az_{③})$
$Y_{NPt} = Y_{Pt} - HD_{②} . \cos (Az_{②}) + HD_{③} . \cos (Az_{③})$
$Z_{NPt} = Z_{Pt} - VD_{②} + VD_{③}$, si h de la cible reste identique

c) Visée arrière ②, et visée avant ③ vue en plan

Pt : Point de mesure du premier transect
NPt : Nouveau point de mesure du second transect
SD : Distance réelle
HD : Distance horizontale
VD : Distance verticale
Az : Azimut

Figure 2-16
Cheminement topographique simplifié et calculs trigonométriques de coordonnées

Pour accélérer la prise de données un petit ordinateur portable Psion Workabout a été utilisé comme carnet électronique, les valeurs enregistrées sur le terrain étant exportées sur un tableur puis traitées à l'aide de petites macro-commandes que nous avons développées en langage *Visual Basic (VBA)* sur le logiciel *Excel* (Cf. détails des macro-commandes en annexe).

Un contrôle des fermetures angulaires, en mesurant les stations en sens inverse (de l'amont à l'aval), a permis d'estimer la qualité de l'ensemble des mesures effectuées dans le chenal du Manival (amont de la plage de dépôt). En planimétrie, sur les axes x (latitude) et y (longitude), les écarts sont respectivement d'environ 8 et 2 mètres, alors qu'en altimétrie, axe qui nous intéresse plus particulièrement pour l'étude des variations du stock sédimentaire, l'écart de 66 centimètres est une valeur tout à fait acceptable en fonction à la fois de notre objectif d'étude et de la rapidité des mesures effectuées.

1.2.3. Application au torrent du Manival : création d'un MNT précis du chenal

Dans un premier temps, notre choix a été de constituer, une base de données topographiques détaillée de l'ensemble du chenal nous servant de référence par la suite. Dans de nombreuses études géomorphologiques sur le calcul de bilans sédimentaires [Hubbel, 1964 ; Ashworth et Ferguson, 1986 ; Lane *et al.*, 1994 ; Westaway *et al.*, 2000 ; Brasington *et al.*, 2003], les données collectées sur le terrain ont été utilisées pour créer un MNT, ce qui a pour avantage un traitement très souple et rapide à l'aide de logiciels adaptés. Dans les paragraphes qui suivent, sont présentés la modélisation numérique de terrain et le logiciel utilisé, le mode d'échantillonnage de mesures, la méthode de calcul et les problèmes liés à l'élaboration du MNT du chenal torrentiel.

A. Définition et possibilités offertes par le MNT

Un MNT est une représentation de l'altitude sur un espace donné qui modélise une surface topographique. Celle-ci est représentée par une grille souvent régulière dont chaque nœud est défini par ses coordonnées sur les axes x, y et z. Des points sont mesurés soit sur le terrain, soit par une autre méthode topométrique comme la photogrammétrie, mais ne coïncident pas souvent avec les nœuds du MNT qui sont généralement bien plus nombreux. Les valeurs z, représentées numériquement par une matrice, sont alors interpolées à partir des points mesurés. L'interpolation est l'estimation d'une valeur inconnue d'un caractère, ici l'altitude, en un lieu donné, en fonction d'une hypothèse de répartition de ce caractère. Par un calcul mathématique à partir de données brutes irrégulièrement réparties dans l'espace, cela permet d'obtenir un maillage qui donne une représentation en trois dimensions de la surface étudiée.

Une fois le MNT constitué, il offre des possibilités de traitements quantitatifs intéressants : la comparaison de plusieurs surfaces topographiques prises à des dates différentes, par simple superposition et soustraction de grilles ; le calcul rapide d'un volume par rapport à un niveau de référence ; l'extraction de transects, etc. En géographie, le MNT est très utilisé dans l'orthorectification des photographies

aériennes. En outre il permet une représentation graphique synthétique et rapide de la topographie ; ce qui constitue un avantage précieux pour appréhender la logique spatiale d'un phénomène.

Nous avons choisi d'utiliser le logiciel *Surfer* (versions 6 à 8) dédié à la représentation spatiale de MNT, pour effectuer les interpolations et représenter les grilles numériques d'altitude. L'atout de ce logiciel est qu'il offre dans le même temps une facilité d'utilisation grâce à la convivialité de son interface et des fichiers d'aide très explicites, et une restitution graphique (2D et 3D) simple à mettre en oeuvre. D'autres logiciels permettent aussi le traitement et la représentation de MNT, mais ils sont souvent plus difficiles à maîtriser : des logiciels dédiés aux SIG (Systèmes d'Information Géographique) comme *Idrisi* ou *ArcInfo* ; des logiciels dédiés aux traitements d'images aériennes comme *Erdas Imagine* ou *Ermapper* ; ou encore des logiciels dédiés aux applications mathématiques comme *MatLab*.

B. Choix méthodologique d'un échantillonnage en transects transversaux.

La construction du MNT d'un torrent implique une répartition particulière des points de mesure du fait de la dimension linéaire de l'objet d'étude. Contrairement aux conditions rencontrées habituellement, où l'on a une large surface à couvrir, un torrent ou une rivière présentent une distorsion de ses proportions : sa longueur (plusieurs kilomètres) est largement supérieure à sa largeur (une vingtaine de mètres). Or les formes de terrain que l'on cherche à restituer, telles que les levées latérales simples ou multiples laissées par les laves torrentielles, impliquent une forte densité de points de mesure dans le sens de la largeur. Ne pouvant pas assurer une telle densité d'échantillons dans le sens longitudinal, pour une raison de temps facilement compréhensible, nous avons opté pour un échantillonnage en profils transversaux régulièrement répartis le long du linéaire du torrent (**Cf. Fig. 2-17**), approche classique en géomorphologie fluviale.

Sur chaque profil en travers, les mesures sont distantes d'un mètre environ et tiennent compte des principales ruptures de pente ; ces transects sont eux-mêmes espacés d'une dizaine de mètres, voire moins suivant la configuration du terrain, comme le préconisent Malavoi et Souchon [1989], en particulier lors de la présence de seuils artificiels dont on a systématiquement mesuré le pied et le sommet.

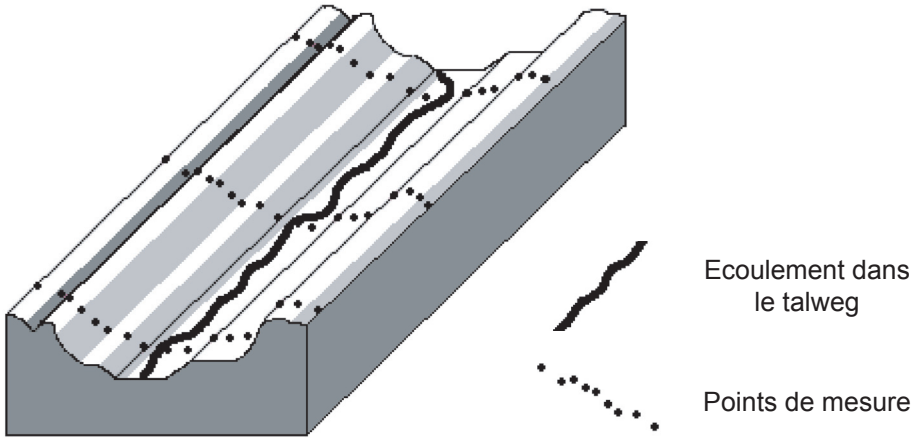


Figure 2-17
Répartition de l'échantillonnage des points de mesure dans le cas d'une forme linéaire telle qu'un torrent (Le Méhauté, 2000)

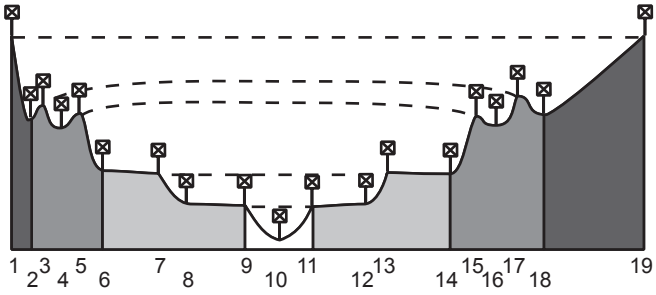
C. Problèmes rencontrés lors du traitement des données pour élaborer le MNT du chenal

Après avoir fait les mesures sur le terrain, le traitement des données s'est parfois montré long et fastidieux. Le MNT doit rendre compte de la topographie réelle du terrain, même simplifiée, mais la forme longiligne du chenal torrentiel peut facilement engendrer des imprécisions ou des erreurs générant des formes invraisemblables. De notre expérience, il résulte trois principaux groupes de problèmes liés à :

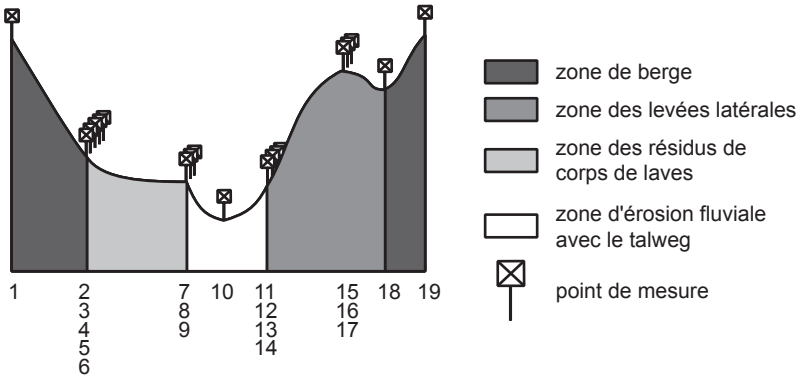
- Un post traitement des données trop long et complexe ;
- Une répartition des points de mesure pas assez homogène ;
- La limite de la zone d'étude du chenal.

Une rapide analyse de la topographie de profils en travers du chenal a montré une récurrence de formes liées aux passages de laves torrentielles telles que les levées latérales ou les basses terrasses formées des dépôts de corps de lave ré-incisés. Pour reproduire la topographie d'un transect, à chaque forme a été attribué un nombre de points de mesure fixe ; par exemple, 2 points de mesure pour une levée latérale, le premier au sommet et le second en pied de levée. Par contre, chaque profil en travers ne regroupe pas le même nombre de ces formes caractéristiques, et certains profils nécessitent donc plus de points. Etant donné la grande quantité de points mesurés, le nombre variable de points constituant un transect rend quasiment impossible toute automatisation d'un quelconque traitement des données. Pour éviter cela, nous avons défini le profil type le plus complexe composé de 19 points de mesure (prenant en compte des berges vers le centre du chenal : les pieds de berges, les levées latérales, les résidus de corps de lave, et les chenaux d'érosion fluviale incisant le milieu du chenal). A partir de là, ce nombre de points a été conservé pour tous les transects même lorsque le nombre de formes était réduit à cause de l'érosion de certaines d'entre-elles ; dans ce cas certains points ont été mesurés plusieurs fois comme le montre la **figure 2-18**. Le temps passé à réitérer les mesures a été largement compensé par la rapidité du post-traitement.

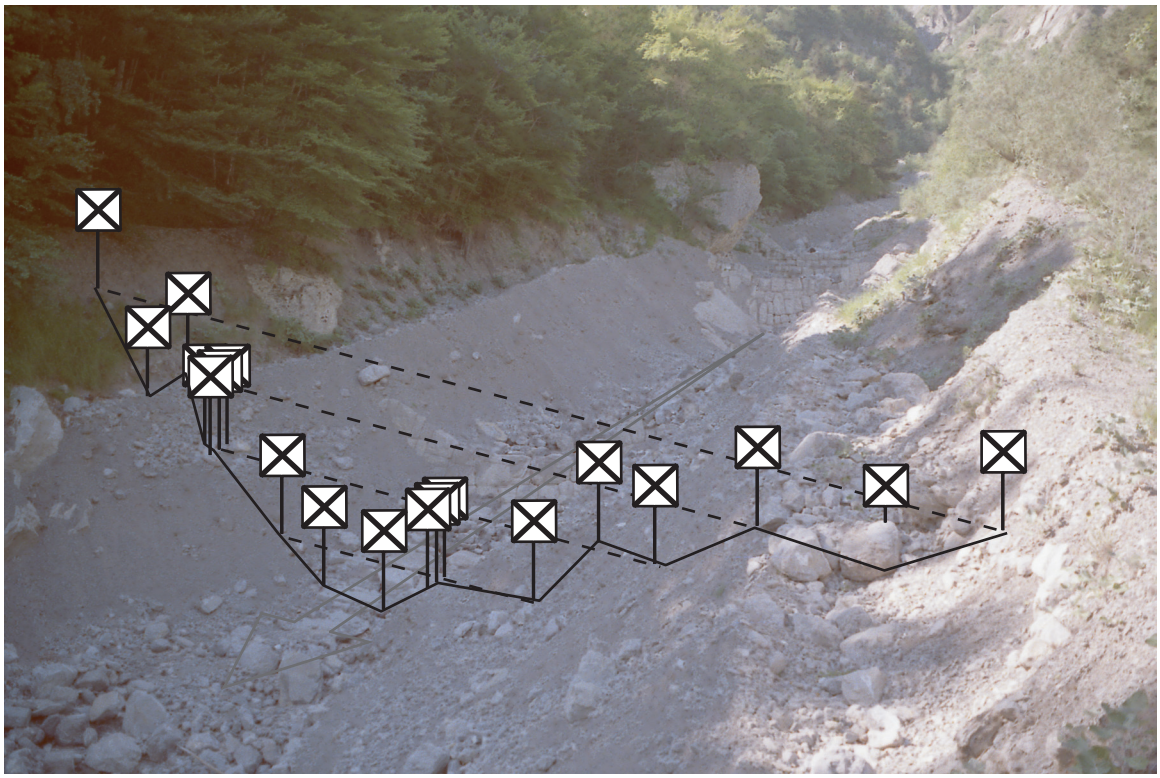
Comme nous l'avons déjà mentionné, la répartition homogène des points de mesure dans un chenal torrentiel n'est pas réellement envisageable ; pourtant ceci est un point crucial pour obtenir un MNT représentatif de la réalité car un point isolé peut entraîner des déformations importantes. On peut imaginer ajouter des points de mesure supplémentaires sur les berges pour mieux délimiter le chenal torrentiel : la **figure 2-19** représente de manière simplifiée cette configuration. Le MNT, au lieu de présenter une élévation régulière entre les deux profils en travers, montre que le fond du chenal tend à s'exhausser localement au niveau des points supplémentaires et que les formes "s'étirent" latéralement (**Cf. Fig. 2-19**). Dans ce cas le MNT ne peut pas être utilisé, que ce soit pour estimer les volumes dans le chenal ou pour utiliser des outils de modélisation des écoulements. Pour éviter ce problème, il est préférable d'éviter les points isolés, et même s'il n'est pas possible de faire un échantillonnage de mesures réparti de manière homogène, la répartition des points doit au moins être régulière (uniquement des transects ayant la même équidistance). Le mode d'interpolation peut alors compenser cette répartition non optimale. Pour créer des cartes topographiques, l'interpolation par triangulation à partir d'un échantillon irrégulier de points donne de bons résultats [Jones, 1997]. Notons



Profil en travers regroupant un grand nombre de formes torrentielles.

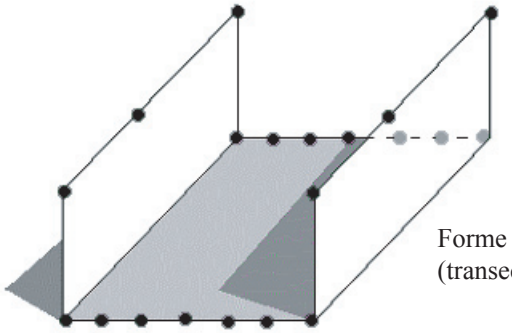


Profil en travers plus simple avec des mesures répétées plusieurs fois sur le même point pour conserver 19 points de mesure par transect

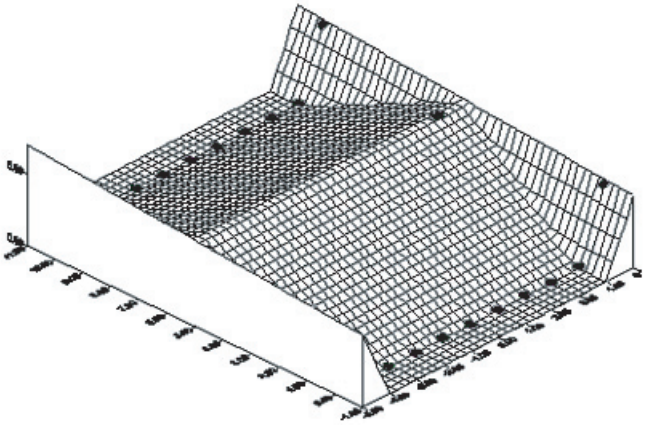


Exemple de mesures d'un profil en travers du chenal du Manival

Figure 2-18
Echantillonnage dense de 19 points de mesures topographiques par transect sur la base d'un profil en travers regroupant un grand nombre de formes torrentielles caractéristiques



Forme initiale et répartition des points de mesure
(transects et 2 points intermédiaires sur les berges)



MNT obtenu

Figure 2-19
Exemple de mauvaise représentation dû à une répartition non-homogène des points de mesure (Le Méhauté, 2000)

que ce type d'interpolation est reconnu comme le plus adapté pour constituer un MNT proche des points de mesure de terrain donc du relief naturel ; par contre les formes sont généralement plus brusques et la représentation moins esthétique qu'à partir d'autres formes d'interpolation comme le krigeage. La méthode la plus efficace pour choisir le mode d'interpolation est d'en essayer un grand nombre et de comparer les résultats avec les formes de terrain. C'est ce qui est reporté sur la **figure 2-20** avec un tronçon de chenal caractéristique, montrant que la méthode de calcul par triangulation était celle la plus adaptée à la structure de nos données de terrain, bien que nous ayons utilisé des paramètres standards pour chaque interpolation. Contrairement à d'autres méthodes, la triangulation reste assez performante dans le cas d'un espacement irrégulier dans l'espace des points de mesure et parvient à retranscrire les ruptures de pente [Lane *et al.*, 1994]. La triangulation est un algorithme qui crée des triangles en traçant des lignes entre les points de mesure. Ces derniers sont reliés entre eux de sorte que les côtés des triangles formés ne se recoupent pas. Le résultat est une juxtaposition de triangles sur toute la surface de la grille, chacun d'entre eux formant un plan dans l'espace. La coordonnée altitudinale, z, de chaque nœud du maillage est déterminée en superposant leurs coordonnées planimétriques, x et y, à l'altitude définie par les triangles. C'est donc une méthode d'interpolation de type linéaire, qui convient bien à la forme longiligne du chenal, bien qu'il soit possible d'utiliser d'autres méthodes d'interpolation tel que le krigeage en leur appliquant des contraintes supplémentaires comme les options d'anisotropie. Quelle que soit la méthode de calcul utilisée, nous nous sommes rendu compte qu'elle était efficace uniquement sur une portion de chenal rectiligne. En effet, la **figure 2-21** compare les résultats pour une portion de chenal rectiligne et pour un tronçon courbe. Dans le second cas on voit nettement que

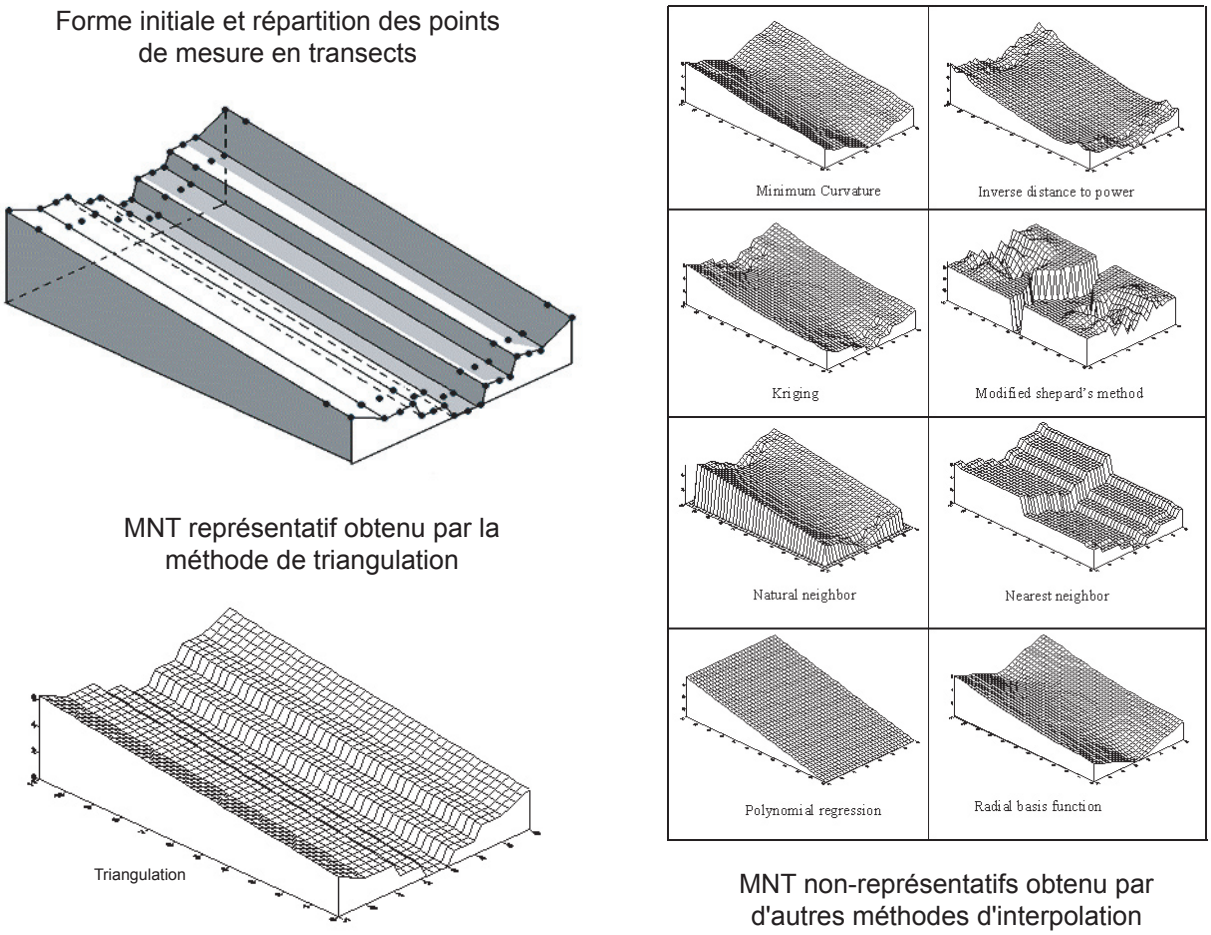
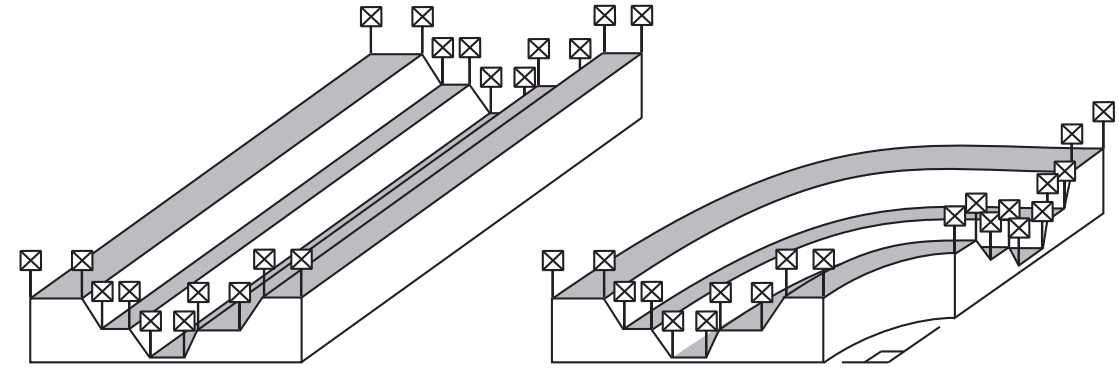


Figure 2-20
Restitution numérique d'une forme fictive représentant un tronçon rectiligne de chenal torrentiel en fonction de différentes méthodes d'interpolations : la triangulation (à gauche) est beaucoup plus représentative que les autres méthodes (à droite) (d'après Le Méhauté, 2000)

les bourrelets latéraux ou les basses terrasses du premier profil en travers ne sont pas raccordés aux formes correspondantes du second transect. Ainsi par exemple, les points situés au sommet d'une même levée latérale ne sont pas correctement reliés entre eux sur le MNT. Pour palier ce problème nous avons utilisé des lignes de forçage reliant les points de deux transects successifs ayant les mêmes formes caractéristiques (talweg, levées, etc.). Sur ces lignes, des points ont été répartis par interpolation linéaire tous les mètres, créant ainsi un réseau plus dense et homogène de points. Puisque les profils en travers ont le même nombre de points de mesure, cette interpolation linéaire a pu être facilement automatisée avec une macrocommande programmée en *VisualBasic* (VBA) sur le logiciel *Excel* (Cf. détails des macros-commandes en annexes). A partir de la version 7 du logiciel *Surfer*, il est possible de définir des *break-lines* ou des *fault-lines* qui peuvent remplacer les lignes de forçage.

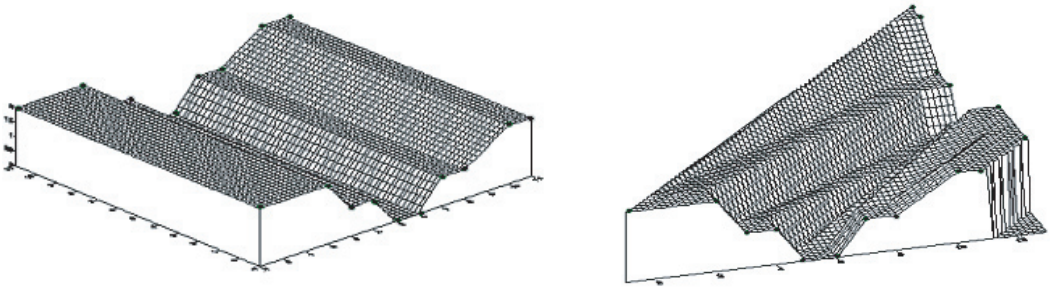
Enfin, il faut prêter une attention particulière aux limites de la zone à modéliser. Les limites de deux zones à comparer doivent bien se superposer, et surtout la zone d'étude doit toujours être bien délimitée par des points de mesure, sans quoi le MNT serait calculé non pas par interpolation mais par extrapolation, ce qui rend la qualité des résultats catastrophique. La taille des mailles de la grille intervient également dans la précision des calculs effectués entre différents MNT. Mais il s'agit là de problèmes classiques d'utilisation des MNT quel que soit le sujet d'étude.

Les modèles numériques de terrain permettent de comparer de manière rapide, simple et efficace deux surfaces topographiques, en particulier avec un logiciel du type de *Surfer*. Cependant selon la précision souhaitée, un problème de calage des images peut se poser ; la qualité de calage doit correspondre au degré d'erreur acceptable pour l'étude. Dans tous les cas une interprétation prudente des résultats, qui tient compte des observations de terrain, de la limite des outils utilisés et des défauts de méthode, est indispensable. L'élaboration d'un MNT doit faire face à certaines contraintes que nous avons citées, et l'utilisation de cet outil semble mieux adaptée pour le traitement de mesures détaillées que pour des mesures plus sommaires vers lesquelles nous voulons nous orienter afin de simplifier le protocole d'échantillonnage. De plus, notre objectif est l'estimation des volumes accumulés dans le chenal, quelles que soient les formes particulières que l'on peut y observer. Malgré la facilité d'utilisation des MNT, la difficulté de leur mise en place pour l'ensemble du chenal torrentiel nous a incité à utiliser directement des mesures de profils en long et en travers. La technique des casiers sédimentaires, très classique en géomorphologie, consiste à relever des profils en travers représentatifs que l'on replace sur un profil longitudinal du chenal. Contrairement aux mesures en trois dimensions, elle ne prend pas en compte l'orientation du chenal, mais permet, en fonction d'un niveau de base théorique, le calcul les volumes.



Chenal rectiligne entre deux transects parallèles

Chenal courbe entre deux transects perpendiculaires



MNT correct

MNT incorrect, les niveaux altitudinaux entre les deux transects ne correspondant pas

Figure 2-21
Difficulté de restitution des formes du chenal torrentiel dans les parties courbes (interpolation par triangulation)

2. Collecte des données : les notions de profil en travers et de section d'ablation maximale

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, la modélisation de la surface du chenal sous forme de MNT est fastidieuse et délicate même si l'utilisation finale des MNT peut être simple et rapide. De plus, le nombre important de points de mesure que nous avons effectués sur l'ensemble du chenal, rend cette méthode assez mal adaptée pour une surface aussi importante : elle n'est pas vraiment utilisable sur les photographies aériennes anciennes dont nous nous sommes servis, car tous les points à mesurer ne sont pas toujours visibles ; le trop grand nombre de données à acquérir et à traiter la rend trop coûteuse (en temps et/ou en argent). La simplification du recueil de l'information topographique a donc été nécessaire.

L'objectif de notre travail étant d'évaluer le volume potentiellement mobilisable par une lave torrentielle, il n'était pas possible de se contenter d'utiliser la surface topographique. Afin de prendre en compte la dimension verticale, indispensable au calcul de volumes, il nous a fallu définir un niveau altitudinal de référence. Il s'agit de définir un profil en long et des profils en travers constituant la base topographique. Cette base correspond à la topographie hypothétique qui résulterait des processus d'affouillement généralisé du chenal à l'occasion d'une crue d'ampleur exceptionnelle.

Avant de nous intéresser à la réduction du nombre de mesures nécessaires, nous avons défini dans ce chapitre une section type correspondant à l'érosion maximale qui aurait suivi le passage d'une lave torrentielle. En effet, le mécanisme du transport solide de ce type de torrent comporte généralement deux phases successives : une accumulation des matériaux dans le chenal pendant un laps de temps plus ou moins long, puis un curage de ces matériaux lors des crues (Cf. supra). Le remplissage du chenal évolue au cours du temps créant ainsi différentes formes de surface au niveau de chaque profil en travers. Pour calculer le volume potentiellement mobilisable, il faut déterminer la base topographique de chaque profil en travers. Les descriptions d'événements torrentiels sont alors fort utiles pour connaître la forme du chenal juste après le passage d'une lave.

Nous avons donc déterminé d'une part, la forme hypothétique du transect affouillé par la lave que nous nommerons Profil en Travers d'Ablation (PTA), et d'autre part, l'altitude du fond correspondant à un niveau de référence défini par un Profil en Long d'Ablation de Niveau de référence (PLAN). Le principe pour estimer les volumes de matériaux du chenal potentiellement mobilisables consiste à utiliser ce niveau de référence en dessous duquel le torrent ne peut théoriquement plus éroder, en faisant la différence entre la surface topographique et ce niveau de base matérialisé par les PTA calés sur le PLAN.

2.1. Profil en Travers d'Ablation (PTA)

Après le passage d'une lave torrentielle, la forme générale des transects du chenal torrentiel est rectangulaire. Différentes approches convergent pour justifier cette forme caractéristique :

- Les approches théoriques, en particulier celle que nous avons décrite dans le premier chapitre et représentée sur la **figure 1-12**, selon le modèle de Bingham [Johnson, 1970 ; Meunier, 1991 ; Desloges, 1992], montrant que l'érosion du passage d'une lave torrentielle laisse une forme de profil en travers caractéristique en "U";
- Les observations de terrain que nous avons pu faire, montrant des berges subverticales ou verticales, en particulier juste après le passage d'une lave. Ces observations sont également confirmées par les descriptions de différents auteurs [Johnson, 1970 ; Aulitzky, 1982 ; Thouret *et al.*, 1995 ; Lavigne et Thouret, 2000]. Cette forme est bien sûr plus ou moins bien marquée en fonction du degré de cohésion des matériaux. De plus, la présence et la localisation du bedrock peut modifier cette forme en "U": ceci est particulièrement fréquent dans les ravins de la tête du bassin où l'on observe plutôt une forme en "V".

Ainsi, la forme des PTA du chenal torrentiel sera donc rectangulaire. Elle a été délimitée de part et d'autre du chenal par deux verticales au droit des premier et dernier points de mesures topographiques de surface correspondants à la base des berges (**Cf. Fig. 2-22**). Si l'on veut faire un parallèle avec l'hydrologie ou l'hydraulique fluviale, en remplaçant les sédiments mobilisables par de l'eau, l'aire de la section mobilisable comprise entre le PTA et la surface topographique correspondrait à la section mouillée. Afin de compléter cette forme en "U", le niveau altitudinal du fond représenté par une droite horizontale doit être déterminé.

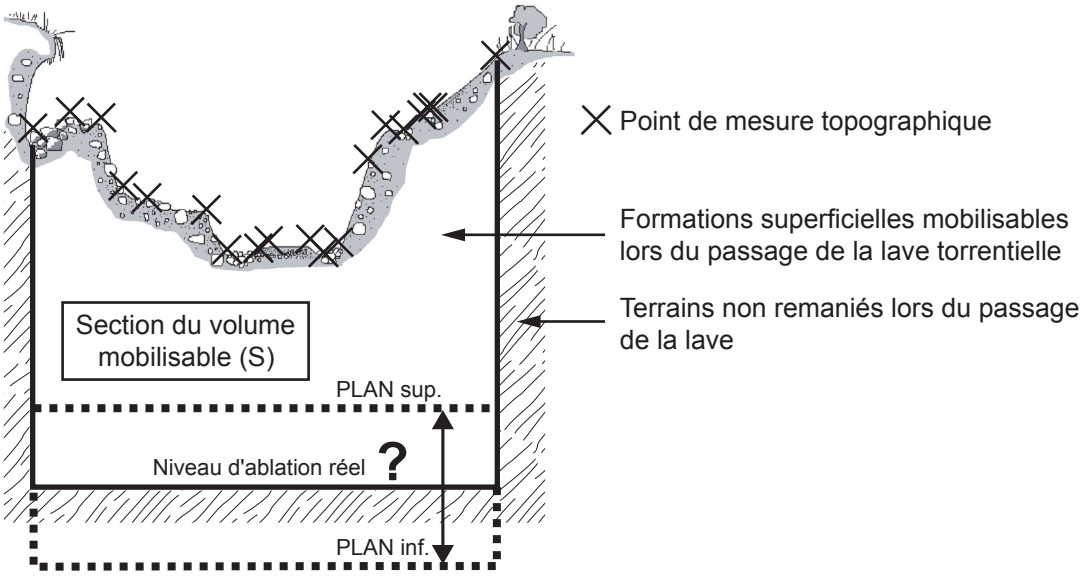


Figure 2-22
Forme du Profil en Travers d'Ablation (PTA) maximale lors du passage d'une lave torrentielle extrême. Les berges sont alors verticales et le niveau du fond est déterminé par les Profils en Long d'Ablation de Niveau supérieur et inférieur (PLAN sup. et PLAN inf.)

2.2. La notion de Profil en Long d'Ablation (PLAN) et les hypothèses sur sa forme et sa position

L'altitude du fond du Profil en Travers d'Ablation (PTA) dépend de sa position dans le profil en long. Dans les systèmes torrentiels, les crues successives ont tendance à éroder le fond du chenal abaissant ainsi le niveau du profil en long. Cet enfoncement déstabilise le pied des versants et augmente alors la recharge sédimentaire du chenal, faisant des torrents des zones de forte production. Pour conserver un équilibre dynamique certains processus, appelés boucles de rétroaction négatives dans l'approche systémique, peuvent freiner cet enfoncement :

- Le pavage du fond du chenal est fréquent dans les cours d'eau de montagne et permet de maintenir le niveau du profil en long lors des écoulements "d'eau claire". Mais il est généralement détruit lors du passage d'une lave torrentielle.
- Les blocs rocheux de très grande taille provenant des versants peuvent stopper l'enfoncement du chenal, mais souvent le talweg a tendance à rapidement les contourner.
- Les points durs sont les seules formes efficaces qui puissent stabiliser le profil en long. Ces derniers sont naturellement fréquents en tête de bassin sous forme d'escarpements et de seuils rocheux, comme par exemple un pli calcaire qui traverse le chenal. Cet endroit, difficile à éroder, empêche l'enfoncement du talweg et constitue un point de contrôle aval du profil en long. Depuis de nombreuses années, les gestionnaires des risques torrentiels ont observé et compris le rôle de ces points durs. C'est ainsi que certains torrents comme le Manival ont été aménagés par de nombreux seuils artificiels, barrages de correction torrentielle en pierre ou en béton qui constituent autant de points durs visant à endiguer les processus d'affouillement.

Nous avons considéré que, généralement, le profil en long, même après le passage d'une lave torrentielle extrême, ne pouvait pas être érodé en dessous du niveau des points durs situés à l'aval. Bien sûr, l'utilisation des seuils artificiels comme points durs sous-entend que ces derniers ne seront pas détruits lors de la crue. En cas de doute, il est possible de faire un scénario ne prenant pas en compte certains barrages "RTM". Le profil en long a toujours été mesuré dans le fond du talweg, c'est à dire le point le plus bas de chaque transect. La localisation des points durs est importante car ils vont déterminer le niveau de référence pour les calculs de volumes, et elle nécessite dans tous les cas une expertise de terrain qui peut s'appuyer sur divers outils tels que la documentation d'archive, la prospection géophysique, l'analyse géologique, etc.

La position de chaque profil en travers (PTA) sur le profil en long du chenal est variable ; il faut donc déterminer le niveau de l'ensemble du profil en long d'ablation (PLAN), entre les points durs qui restent fixes. Lors des crues, les conditions extrêmes dans les torrents font qu'aucune expérience de terrain n'a pu situer avec certitude la limite inférieure de l'érosion du torrent. Quant aux expérimentations en canal de laboratoire, elles n'apportent pas d'éléments concluant sur ce thème car elles s'intéressent plus au déclenchement des laves torrentielles qu'à leurs conséquences sur la topographie du chenal [Tognacca et Bezzola, 1997 ; Chen et Yang, 2000 ; Tognacca *et al.*, 2000]. De ce fait, nous avons choisi d'évaluer

les volumes érodés par la crue torrentielle en nous fondant sur une sélection de profils hypothétiques (Profils en Long d'Ablation de Niveau supérieur et inférieur, PLAN inf. et PLAN sup.) sous la dépendance des points durs qui les maintiennent.

2.2.1. Profil a (PLAN sup.) : hypothèse correspondant à une pente d'équilibre (ou de compensation)

Dans cette hypothèse, les niveaux les plus bas atteints lors de la crue sont représentés par une droite reliant le sommet du point dur aval et la base du point dur amont (**Cf. Fig. 2-23 a**). Ce profil de référence est directement inspiré des méthodes empiriques utilisées par les services de la RTM pour dimensionner les distances entre les ouvrages lors des phases d'aménagement torrentiel. La pente entre deux seuils successifs est une pente dite "d'équilibre dynamique" [Lane, 1953], appelée aussi pente de compensation [Deymier *et al.*, 1995]. Dans la pratique, la droite est tracée pour arriver un peu plus haut que la base du barrage amont pour éviter l'affouillement de ce dernier. Cette hypothèse donne une estimation minimaliste des volumes, le niveau du fond des Profils en Travers d'Ablation (PTA) étant défini par le Profil en Long d'Ablation de Niveau supérieur (PLAN sup.). En réalité, puisque cette hypothèse correspond à une pente d'équilibre, les sédiments sont parfois érodés en dessous de ce niveau avec un profil en long ayant une forme générale concave vers le haut, en particulier lorsque les seuils sont éloignés l'un de l'autre. Bien que ce niveau de référence soit bien approprié pour comparer différents états de remplissage sédimentaire, à différentes dates par exemple, nous avons cherché à déterminer un niveau plus bas au-delà duquel la crue ne puisse jamais éroder, car celui-ci n'est pas en permanence le niveau le plus bas et ne correspond donc pas tout à fait au niveau réel d'ablation maximale.

2.2.2. Profil b : profil en long d'ablation maximale observée dans des conditions de déficit sédimentaire

Les observations de terrain montrent que, dans une zone de fort déficit sédimentaire en aval d'ouvrages dominés par un piège à sédiments, la pente du profil en long s'accentue fortement [Gilbert, 1917 ; Williams et Wolman, 1984 ; Montgomery et Buffington, 1993]. Pour le torrent du Manival, les mesures que nous avons faites montrent une pente maximale de 7,5° immédiatement à l'aval de la plage de dépôt alors que la pente moyenne du chenal dans cette zone est de 5° (**Cf. Fig. 2-24**).

Cette forme concave bien marquée s'explique par des processus de dissipation d'énergie et par le calcul de puissance [Costa, 1987 ; De Jong, 1992 ; White *et al.*, 1997 ; Batalla *et al.*, 1999 ; Li et Abrahams, 1999]. La plage de dépôt piégeant l'ensemble des matériaux, à l'aval de celle-ci, l'énergie qui servait au transport solide est alors disponible pour l'érosion. Le système torrentiel va tenter de retrouver son équilibre en affouillant le chenal. Le torrent étant caractérisé par des pentes fortes, l'érosion par divagation latérale est limitée et on assiste majoritairement à un affouillement au tracé remarquablement linéaire : c'est ainsi surtout le fond du chenal qui s'abaisse plus que les berges qui reculent. Ce surcreusement est très important juste à l'aval de la plage de dépôt où la charge solide est

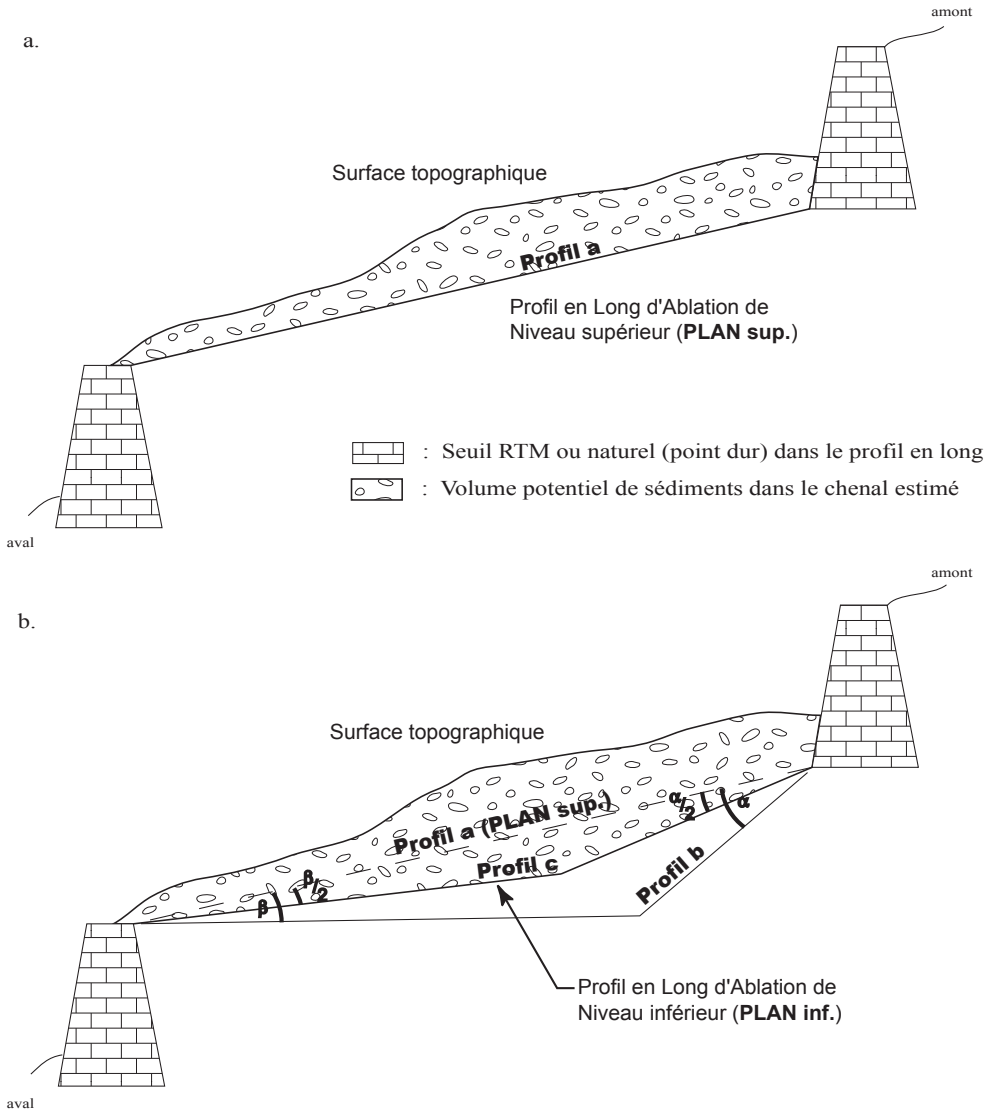
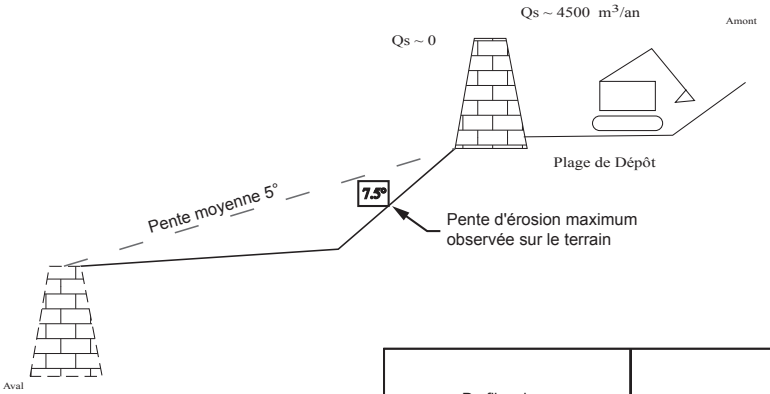


Figure 2-23
Deux hypothèses de niveaux de référence du fond : a. PLAN sup., une hypothèse minimaliste correspondant à une pente d'équilibre ou de compensation (profil a), b. PLAN inf., une hypothèse maximaliste (profil c) en fonction des pentes observées dans des conditions de fort déficit sédimentaire (profil b)



Profil en long	(sans échelle)					
Localisation de zones du chenal à pentes homogènes	Aval de la Plage de dépôt	Plage de dépôt	Barrage RTM49-RTM48	Barrage RTM48-RTM47	Barrage RTM47-RTM26	Barrage RTM26-RTM1
Pente moyenne des zones du chenal	**5°**	7°	13.5°	8.5°	11.5°	24°
Pente d'érosion maximum calculées à partir des observations	**7.5°**	10°	19°	12.5°	17°	34.5°

X 1.5

Figure 2-24
Représentation schématique de la pente d'érosion maximale observable en situation de déficit sédimentaire extrême. Les valeurs correspondent au torrent du Manival, avec Qs, le débit solide

quasiment nulle, puis le torrent se recharge peu à peu et son activité érosive décroît ; la pente qui s'était fortement accrue retrouve alors des valeurs plus faibles.

Le chenal étant plus pentu dans sa partie amont, ce rapport de 1,5 (7,5° / 5°) empiriquement déterminé par l'observation a été conservé comme base de détermination des pentes maximales envisageables en contexte de déficit sédimentaire profond, sur l'ensemble du chenal (en aval des points durs et pour différentes gammes de pentes moyennes)(**Cf. Fig. 2-24**). La détermination d'une telle pente d'ablation maximale nous semble toutefois peu réaliste pour tout le linéaire torrentiel car, de notre point de vue, de telles conditions ne peuvent apparaître que dans un contexte de déficit sédimentaire artificiellement entretenu par des extractions régulières, ce qui n'est pas le cas dans le chenal en amont de la plage de dépôt.

2.2.3. Profil c (PLAN inf.) : hypothèse correspondant à une ablation maximale

Pour déterminer un profil inférieur hors des conditions de déficit sédimentaire extrême des zones de curage du chenal, nous avons examiné la possibilité de retenir une situation intermédiaire entre le profil a et le profil b.

Notre choix a été de définir un Profil en Long d'Ablation de Niveau inférieur (PLAN inf.) fondé sur le tracé de deux segments de droite entre deux points durs :

- en aval du point dur supérieur, un segment d'angle α / 2 , α étant l'angle entre le profil a et le profil b (**Cf. Fig. 2-23 b**),
- en amont du point dur inférieur, un segment d'angle β / 2 , β étant l'angle entre le profil a et le profil b que l'on considérera comme horizontal par souci de simplification (**Cf. Fig. 2-23 b**).

Les angles α / 2 et β / 2 permettent de tracer des segments de droite. Le PLAN inf. est obtenu par le prolongement de ces segments jusqu'à leur point d'intersection.

En l'absence de connaissances sur le niveau d'ablation des laves torrentielles, nous avons défini, à partir des points durs, des hypothèses qui permettront le calcul des volumes potentiellement érodés lors d'une crue. La première, relativement simpliste, correspond à une pente d'équilibre représenté par le profil a (PLAN sup.). Elle n'est pas totalement satisfaisante car elle sous-estime systématiquement le volume calculé. Une seconde hypothèse correspondant à des niveaux que l'ablation d'une lave torrentielle ne peut pas atteindre a été représentée par le profil c (PLAN inf.). Son calcul a été permis grâce à l'observation au Manival d'un profil de terrain dans une zone de déficit sédimentaire extrême (**Cf. Fig. 2-24** et **Fig. 2-23** profil b). Ainsi les résultats en fonction de ces deux hypothèses, PLAN sup. et PLAN inf., devraient encadrer l'estimation réelle.

2.2.4. Tentatives de validation des hypothèses (PLAN) par des expérimentations sur le torrent du Manival

A. Prospections géophysiques

Cette expérimentation utilise les techniques de sismique réfraction et de sondage électrique, deux méthodes complémentaires d'observation indirecte du sous-sol. L'objectif était de déterminer une limite entre des matériaux qui n'auraient jamais été remaniés par les crues ou rarement, et des matériaux accumulés récemment entre deux crues. Cette limite correspondrait tout à fait à celle d'une section d'ablation maximale (limitée par le PTA). Le torrent du Manival étant aménagé depuis plus d'un siècle, avec de nombreux barrages tout le long du chenal, on peut considérer que tous ces ouvrages de correction sont atterris depuis de nombreuses années et que des matériaux ont été piégés sans avoir été remobilisés depuis cinquante à cent ans. En surface, les sédiments ont des temps de séjour beaucoup moins longs, au gré des différentes crues. C'est la limite entre des matériaux compactés et des sédiments plus fréquemment mobilisés que nous avons essayé de déterminer.

Nous avons fait l'essai d'une prospection géophysique légère dans la partie aval du ravin du Manival, entre les seuils "RTM" n°2 et n°9, vers 1100m d'altitude où l'accès ne peut se faire qu'à pied (**Cf. Fig. 3-25**). Trois transects d'une longueur de 60 mètres ont été observés par sismique réfraction, le long de chaque berge et au centre du torrent. Neuf profils électriques ponctuels, trois par transects, ont également été établis afin de servir de point de comparaison aux résultats de la sismique réfraction.

Figure 2-25
Prospection géophysique (sismique réfraction et sondage électrique) dans la partie aval du ravin du Manival (Clichés S.V-C.)

Les résultats montrent une grande hétérogénéité des matériaux. Cette première expérimentation n'a pas permis de trouver le niveau recherché, mais tout de même d'établir une séparation entre la roche altérée et la roche mère, plus en profondeur (**Cf. Fig. 2-26**). Malgré l'imprécision des résultats de ces sondages par rapport à notre objectif, on observe toutefois nettement que la limite entre les sédiments mobilisables et la roche est très proche du PLAN inf. Pour rechercher le niveau d'ablation maximum, il faudrait refaire des mesures avec une maille beaucoup plus fine, mais, du fait de l'hétérogénéité des matériaux déposés dans le chenal, les résultats ne sont pas garantis.

Il est intéressant de noter que ce type d'expérimentation, avec une maille plus fine, est potentiellement un bon outil pour localiser les seuils qui seraient enfouis sous les matériaux du torrent lorsque l'on ne dispose pas d'autre source d'information.

Une autre voie de recherche pour répondre à cette problématique, pourrait être l'utilisation d'outils de prospection comme le radar [Givone, 1997 ; Delrieu, 2005], si les conditions le permettent (en fonction de la concentration en argile notamment), ou encore des expérimentations en canal de laboratoire.

B. Observations sur les photographies aériennes anciennes

Une piste complémentaire pour rechercher le niveau d'ablation maximum a été d'utiliser les différentes observations du chenal du Manival sur les photographies aériennes. Nous disposons de plus de dix états sédimentaires entre 1963 et 2000. Sur la base des différents profils en long mesurés par photogrammétrie, l'objectif est de définir quelles sont les limites topographiques les plus basses correspondant au niveau d'ablation maximum observé. Pour reconstituer ce profil en long que l'on peut considérer comme le niveau "extrême le plus bas", nommé ici PLAN obs., tous les profils en long mesurés ont été superposés pour ne retenir que les altitudes les plus basses. Parce qu'il est rare que

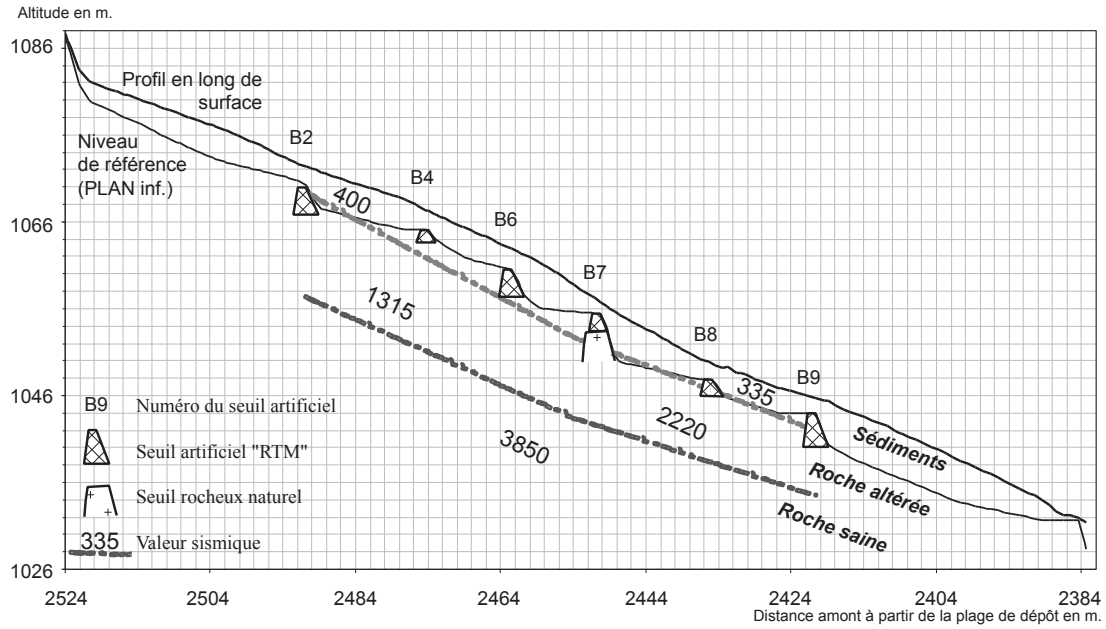


Figure 2-26
Profils sismiques dans le chenal du Manival entre les seuils RTM n°2 (B2) et n°9 (B9) en 2000

le chenal soit totalement curé sur l'ensemble de son linéaire, même après une crue importante, nous avons misé sur la quantité de profils mesurés en espérant avoir une diversité suffisante de l'érosion dans les différents secteurs du chenal.

Comme cela a déjà été expliqué plus haut, le type de photographie d'archive utilisé pour les mesures photogrammétriques (mesures des profils en long) n'offre pas les conditions optimales de précision. Pour les mesures altitudinales, bien que l'ordre de grandeur de cette imprécision soit d'environ 80 centimètres en écart type pour l'ensemble des mesures, le fait de ne sélectionner que les cotes les plus basses entraîne des imprécisions maximales correspondant à trois ou quatre fois l'écart type. Les altitudes sont alors systématiquement sous-estimées avec les valeurs d'erreur les plus fortes, celles-ci pouvant atteindre deux ou trois mètres.

La comparaison des différents profils d'ablation (PLAN sup. et PLAN inf.) montre que dans les biefs amont du chenal où les seuils sont proches, les écarts en altitude entre le PLAN sup. et le PLAN inf. sont souvent inférieurs à deux mètres, donc inférieurs à l'incertitude concernant les altitudes du PLAN obs. La détermination des altitudes de ce profil, à cause des erreurs de mesure liées à la qualité des photographies, ne permet donc pas de déterminer avec certitude un niveau d'ablation maximum réellement observé. Cependant, si l'on compare tout de même, de façon globale, ce PLAN observé avec les deux hypothèses de profils en long de référence (PLAN sup. et PLAN inf.), il correspond assez bien à l'hypothèse maximaliste du PLAN inf. : en comparant les deux profils, PLAN obs. et PLAN inf., en amont du barrage "RTM" n°47 les résultats sur le volume total ne varient que d'environ 10%. Puisque les valeurs mesurées sur les photographies (PLAN obs.) sont sous-estimées, cela signifie que les deux profils, PLAN obs. et PLAN inf., correspondent bien à des hypothèses maximalistes du calcul de l'érosion possible du chenal. Contrairement aux zones amont du chenal, pour des tronçons n'ayant pas de point dur sur une grande longueur, l'écart altitudinal entre le PLAN sup. et le PLAN inf. est bien plus élevé du fait d'un plus fort surcreusement. Les erreurs de mesure de deux à trois mètres sur le PLAN obs. représentent alors un pourcentage sur cet écart bien plus faible, permettant une comparaison de ces différents profils en long (PLAN). Au Manival, cette configuration existe entre le barrage "RTM" n°48 près de la plage de dépôt et le barrage "RTM" n°47 distants d'environ 1 000 mètres en amont. La **figure 2-27** montre que le PLAN obs. se situe alors bien entre les deux hypothèses de PLAN sup. et de PLAN inf.

Le résultat de cette superposition de profils, bien qu'il ne détermine pas un niveau précis de l'ablation maximum réelle, montre toutefois qu'un niveau compris dans une enveloppe délimitée par les PLAN sup. et PLAN inf. constitue une hypothèse non dénuée de sens.

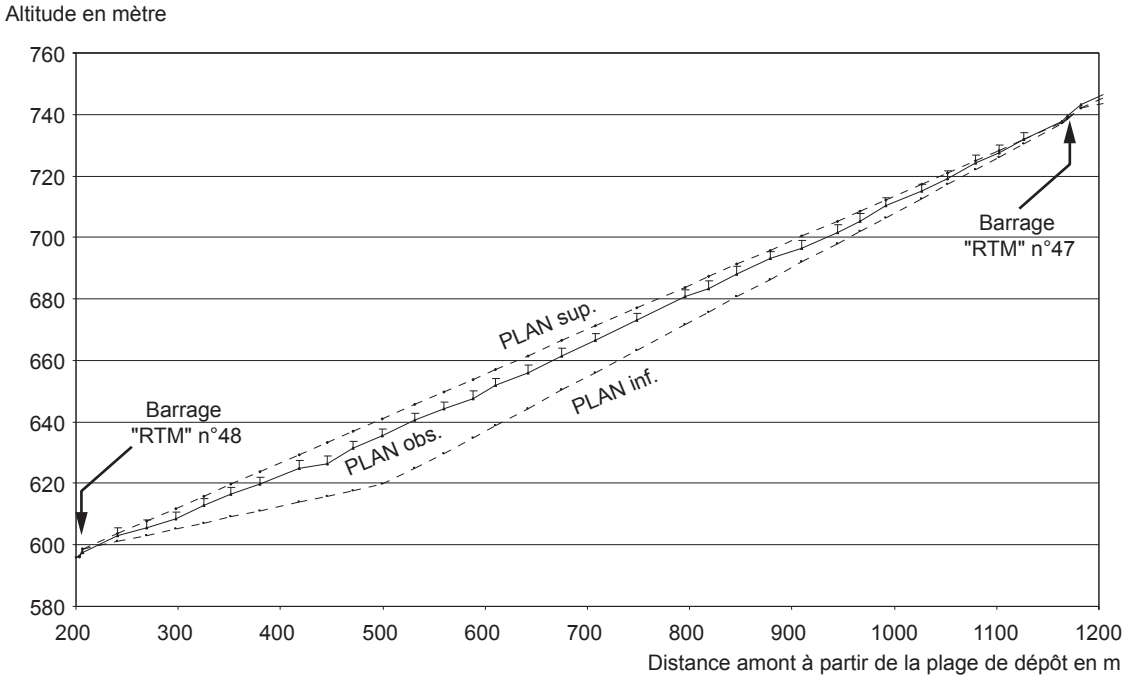


Figure 2-27
Profil d'ablation maximum observé (PLAN obs.) en trait plein, dérivé des mesures de profils en long effectuées par photogrammétrie sur les photographies aériennes d'archives de 1963 à 2000 (l'incertitude (T) est d'environ 2,4 mètres, soit +3 écarts-types)

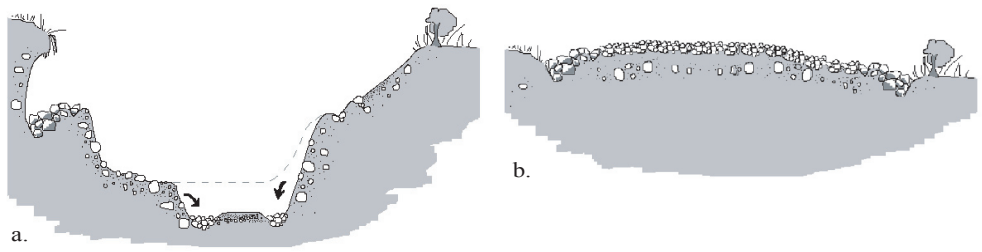


Figure 2-28
Les types extrêmes de formes de profils en travers dans le chenal à lave torrentielle ; a. transect érodé (concave vers le haut), b. transect accumulé (convexe vers le haut)

3. Optimisation de l'échantillonnage topographique

Nous venons de définir deux Profils en Long d'Ablation hypothétiques (PLAN sup. et PLAN inf.) qui encadrent la valeur du niveau d'ablation réelle. Ces hypothèses permettent de déterminer l'altitude du fond des Profils en Travers d'Ablation (PTA), qui nous serviront par la suite à calculer les volumes de matériaux potentiellement mobilisables par une lave torrentielle. Les aires des sections de matériaux mobilisables sont définies par les PTA dont le fond est calé par l'altitude du PLAN sup. (profil a) et du PLAN inf. (profil c), et en surface par la topographie, mesurée sur le terrain ou par photogrammétrie sur les photographies aériennes.

L'objectif de ce chapitre est d'optimiser l'échantillonnage des mesures topographiques. Cette optimisation a été menée à deux niveaux :

- Le premier a consisté à limiter le nombre de points d'acquisition sur un profil en travers sans trop altérer la qualité des résultats ;
- Le second s'attache à régler l'équidistance entre les transects de manière à obtenir un bon compromis entre la qualité de l'estimation des volumes et la quantité d'informations à acquérir, que ce soit par des mesures sur le terrain (cheminement topographique) ou par des mesures sur des photographies (photogrammétrie) avec nécessairement des problèmes liés à la qualité des photographies limitant le maillage de l'échantillonnage.

Jusqu'à présent, la stratégie d'échantillonnage a été de mesurer une vingtaine de points par transect avec une équidistance de dix mètres entre ceux-ci. Ces mesures nous ont permis de disposer d'une base de données volumineuse permettant une modélisation du terrain très proche de la réalité. Elle nous a servi de référence pour le travail d'optimisation présenté ci-dessous.

3.1. Nombre de points de mesure par profil en travers

Pour diminuer le nombre de points à mesurer par transect, nous avons travaillé sur un échantillon d'une quarantaine de profils en travers ayant une grande diversité de formes géométriques, allant de profils érodés à des profils chargés (**Cf. Fig. 2-28**). Ils ont été mesurés, d'aval vers l'amont, entre les barrages "RTM" n°47 et n°46, vers 680 mètres d'altitude, et entre les barrages "RTM" n°10 et n°1, vers 1025 mètres d'altitude.

La méthode d'optimisation a consisté à calculer un modèle statistique représentant chaque profil en travers. Le modèle statistique n'a pas pour objectif de reproduire la forme de la topographie de surface, mais de calculer au plus juste l'aire de la section mobilisable entre le Profil en Travers d'Ablation (PTA) et la surface.

3.1.1. Typologie des profils en travers

Afin de modéliser les profils en travers avec un minimum de points, nous avons dans un premier temps étudié les formes types de ces profils en établissant une typologie.

Concernant la forme du profil en travers, la plupart des indices en géomorphologie fluviale incorporent les variables fondamentales que sont la largeur, la profondeur moyenne et le périmètre mouillé. Nous avons utilisé les deux indices de formes suivants [Amoros et Petts, 1993] p.62 :

- $\omega/_h$, le rapport entre la largeur (ω) et la profondeur (h) ;
- $|A^*|$, un coefficient d'asymétrie où $A^* = (Ad-Ag) / S$ avec Ad et Ag les surfaces mesurées à droite et à gauche de la ligne passant au centre du chenal et S = Ad + Ag.

La **figure 2-29** présente de manière schématique toutes les formes de profils en travers. En plus des profils érodés et des profils chargés (**Cf. Fig. 2-28**), trois types supplémentaires sont constitués de formes intermédiaires. Chacun des cinq types, répartis en trois groupes principaux, ont pu être discriminés par les deux indices de forme retenus :

- le profil d'érosion (type 1) ;
- les profils d'accumulation (types 5 et 4) ;
- les profils "mixtes" (types 2 et 3).

Les deux variables sur chaque axe du système orthogonal (**Cf. Fig. 2-29**) permettent un bon éclatement des points qui représentent les transects, et montre qu'il existe une relation satisfaisante entre d'une part, les deux variables de forme et d'autre part, les formes types permettant de regrouper entre eux les profils en travers observés.

La forme plus ou moins complexe des profils dépend du nombre d'événements qu'ils ont enregistrés, voire de la succession des étapes géomorphologiques au sein d'un événement donné (passage de plusieurs bouffées, ré-entaille de décrue plus ou moins prononcée,…). La mise en place de ces différents types est généralement bien visible lors de l'observation complète d'un événement, directement sur le

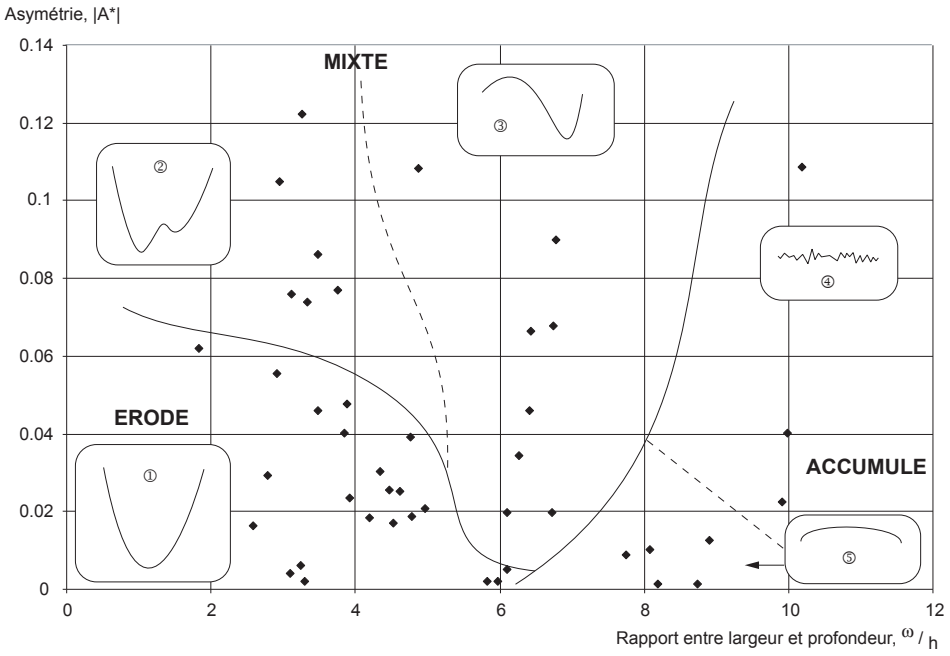


Figure 2-29
Répartition des transects en cinq types de formes et trois groupes principaux

terrain ou sur des films vidéo [Lavigne *et al.*, 2003]. Le dépôt en masse d'une lave torrentielle (lobe) caractérisé par un profil d'accumulation du type 5, ou au contraire l'érosion intense du passage d'une lave combinée à l'érosion fluviale menant à un profil d'érosion du type 1, laissent des formes de profil en travers à la symétrie marquée, différenciées seulement par leur rapport respectif entre largeur et profondeur (ω/h), le profil d'érosion du type 1 étant bien plus profond. Ces deux types pourraient être modélisés par une fonction parabolique ne nécessitant que trois points. Les trois autres types sont des formes intermédiaires, et seul le type 4 qui a une faible profondeur par rapport à sa largeur, reste simple à modéliser ; il suffit d'une droite reliant deux points placés de part et d'autre du chenal. Pour les types 2 et 3, l'action érosive de l'eau, plus fréquente, joue un rôle primordial en créant des formes très asymétriques. Ces profils ont donc des formes plus complexes qui ne peuvent être modélisées qu'avec un plus grand nombre de points.

3.1.2. Modélisation avec 4 points

L'objectif est de modéliser les profils de type 2 et 3 avec le moins de points de mesure possible. Rappelons que l'on veut calculer de manière optimale l'aire de la section mobilisable au droit de chaque profil en travers, la forme de ce dernier n'ayant pas d'importance pour notre étude. Nous avons modélisé la surface topographique par une équation spécifique, le fond étant pris comme une droite horizontale. Afin de trouver le nombre de points minimum nécessaire pour représenter ces profils, nous avons simplement réitéré les deux étapes suivantes :

- Diminution du nombre de points du transect et calcul de l'aire de la section mobilisable entre le Profil en Travers d'Ablation (PTA) et la surface topographique ;
- Comparaison des résultats précédents avec ceux du transect de départ (19 points) détaillant avec précision le terrain (**Cf. Fig. 2-30 a**).

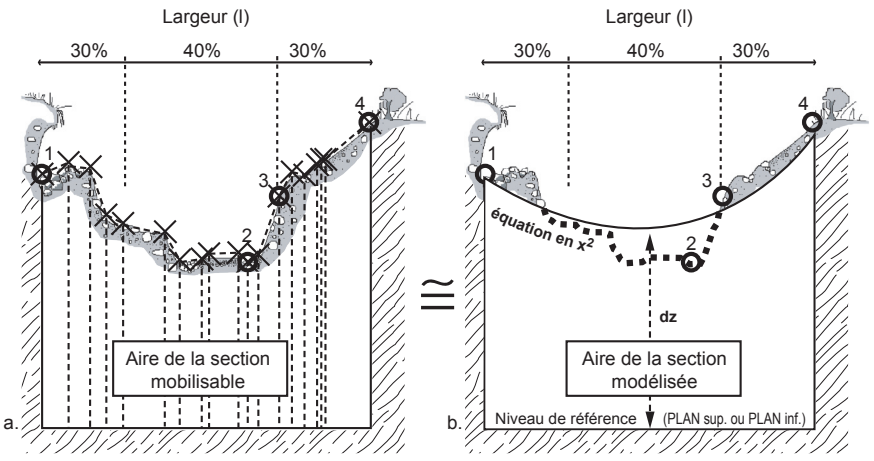


Figure 2-30
Calcul de l'aire de la section mobilisable : a. méthode des trapèzes à partir de nombreux points de mesures, b. modélisation à partir de quatre points de mesure en calculant l'intégrale entre la courbe polynomiale de puissance deux selon la méthode des moindres carrés et la hauteur dz

Après de nombreux essais, il s'est avéré que quatre points par profil en travers suffisent à décrire les types de formes les plus complexes (**Cf. Fig. 2-31**). Pour s'adapter correctement à la géométrie de tous les types de profils en travers, les quatre points doivent toutefois être répartis de la manière spécifique suivante, que l'on travaille sur des photographies aériennes ou à l'occasion de levés de terrain :

- la base de la berge en rive droite, délimitée par la végétation ou une rupture de pente marquée,
- le point le plus bas du profil en travers (talweg),
- le point le plus élevé dans la partie médiane du chenal (éloigné des berges de plus de 30% de la largeur totale),
- La base de la berge située en rive gauche (**Cf. Fig. 2-30**).

Deux d'entre eux, au niveau des berges, délimitent la largeur, alors que les deux autres indiquent plutôt la variation altitudinale du profil.

L'aire calculée est délimitée d'une part par le PTA, composé de deux droites verticales au niveau de la base de chaque berge et d'une droite horizontale au fond matérialisée par l'altitude du PLAN, et d'autre part par la surface topographique. Cette dernière pourrait être représentée uniquement par l'altitude moyenne, créant ainsi une section calculée rectangulaire. La moyenne des altitudes calculée avec seulement quatre points de mesure ne donne pas une altitude moyenne précise du transect ; c'est pourquoi en choisissant les quatre points comme indiqué ci-dessus, nous avons constaté qu'une courbe de tendance polynomiale de coefficient deux selon la méthode des moindres carrés (Cf. détail des macro-commandes en annexe) était plus proche de la surface topographique moyenne. Puis pour obtenir l'aire de la section mobilisable, il suffit de calculer l'intégrale de la courbe en utilisant dz, la différence entre l'altitude du transect (surface) et l'altitude du fond déterminée par le PLAN de référence (**Cf. Fig. 2-30 b**). La **figure 2-31** montre une bonne corrélation entre les aires de section mobilisable mesurées sur le MNT détaillé et celles modélisées à partir des quatre points de mesure. L'analyse

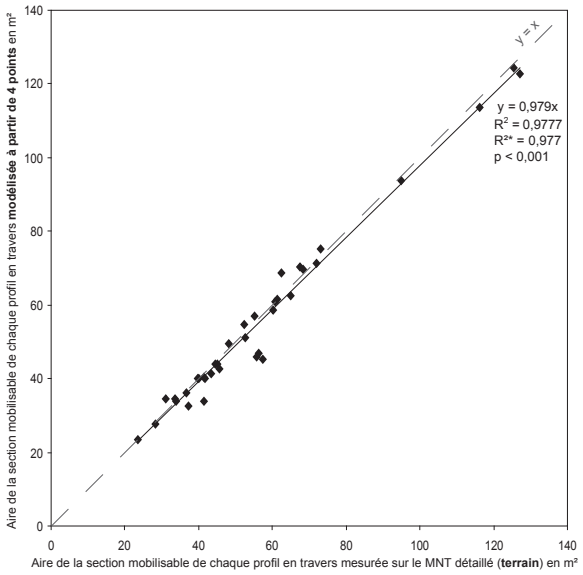


Figure 2-31
Corrélation entre la mesure directe de l'aire de la section mobilisable au droit de chaque profil en travers (sur le MNT détaillé représentant très précisément le terrain) et la modélisation à partir de 4 points de mesures judicieusement choisis sur le profil en travers

de régression simple de cette figure permet de mesurer et de modéliser la liaison statistique entre une variable dépendante (à expliquer) et une variable indépendante (explicative), lorsque ces deux variables sont quantitatives. La qualité de la relation est renseignée, comme pour les autres analyses bivariées de ce type rencontrées dans cet ouvrage, par :

- Le coefficient de détermination, R^2, qui représente la part de la variabilité expliquée par le modèle ;
- Ce même coefficient ajusté, R^{2*}, estimateur sans biais du R^2 réel (sur toute la population) particulièrement utile lorsque l'effectif de l'échantillon est faible ;
- La p-valeur, p, qualifié également de probabilité critique ou de niveau de significativité statistique, qui indique la fiabilité de la relation, c'est-à-dire la probabilité de trouver une relation similaire si l'analyse était conduite sur d'autres échantillons de la même population. Pour être considérée comme une limite acceptable, cette probabilité critique calculée sur le test de nullité du coefficient de régression qui suit une loi de Fisher (test F), doit généralement être inférieure à 0,05 (ce niveau indique qu'il existe une probabilité de 5% pour que la relation entre les variables trouvée dans l'échantillon soit due au hasard) [Daudin *et al.*, 1999].

Les profils dérivés du MNT, très proches des formes réelles, sont composés d'au moins 19 points mesurés sur le terrain ; les aires ont été calculées par la méthode classique des trapèzes (**Cf. Fig. 2-30 b**), calcul assez rapide lorsqu'il est effectué à l'aide d'un logiciel de SIG. Elles ont servi de référence pour valider la modélisation mise en place.

Etant donné le nombre limité de points de mesure (quatre) désormais nécessaire pour modéliser l'aire des sections mobilisables aux profils les plus complexes (types 2 et 3), dans un souci de clarté et de facilité d'utilisation, nous avons décidé que tous les profils en travers seraient modélisés avec quatre points de mesure quel que soit leur type.

3.1.3. Test d'erreur sur la modélisation

Le test d'erreur a été mené sur l'ensemble de l'échantillon, une quarantaine de profils en travers levés le long du chenal torrentiel lors de la phase de topographie par nivellement et dans des sections de formes variables, offrant ainsi un panel diversifié de formes. Ces profils en travers ont été positionnés sur les profils en long d'ablation (PLAN sup. et PLAN inf.) de manière à déterminer le niveau du fond du Profil en Travers d'Ablation (PTA) (**Cf. Fig. 2-22**). C'est à partir de la comparaison des aires des sections entre celles prenant en compte la topographie réelle d'une part, et celles modélisées utilisant seulement quatre points de mesure d'autre part, qu'a été élaboré le test d'erreur.

Le calcul a donc consisté, dans un premier temps, à soustraire pour chaque transect la section réelle à la section modélisée. Cet écart entre les deux sections indique une erreur exprimée en mètre carré. Il dépend donc à la fois de la largeur et de la profondeur, qui peuvent être très variables suivant la position du transect sur le profil en long. Pour obtenir une valeur spécifique exprimée en mètre qui soit

comparable quelle que soit la position du transect, nous avons, dans un second temps, divisé l'écart calculé par la largeur selon la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{(S_R - S_M)}{\omega} \qquad (2\text{-}8)$$

avec ε l'erreur en mètre, S_R et S_M respectivement la section réelle et la section du profil modélisé en mètre carré, et ω la largeur du chenal en mètre.

Avec ce calcul, l'erreur, ε, correspond également à un écart entre la hauteur moyenne de la section modélisée et la hauteur moyenne de la section réelle, car on obtient l'équation suivante avec h la hauteur moyenne en mètre :

$$\varepsilon = \frac{(S_R - S_M)}{\omega} = \frac{S_R}{\omega} - \frac{S_M}{\omega} = h_R - h_M \qquad (2\text{-}9)$$

L'étude statistique sur ces écarts est une étude classique d'une distribution à un caractère [Chadule, 1997]. C'est la moyenne arithmétique et l'écart type qui donnent un ordre de grandeur de l'erreur entre la hauteur moyenne modélisée et la hauteur réelle. Avant de calculer ces paramètres, nous avons vérifié que la répartition des données suivait bien une loi normale (**Cf. Fig. 2-32**). Il existe différents tests pour vérifier que la distribution d'un échantillon suit une loi normale ; parmi ceux-ci il est possible d'utiliser les tests descriptifs d'aplatissement et de symétrie (de *kurtosis* et de *skewness*). On considère que l'échantillon suit une loi normale à 95 % lorsque la valeur de son aplatissement est comprise entre -2 et +2 et que la valeur de son asymétrie est comprise entre -2 et +2 [Ramousse *et al.*, 2004]. Notre jeu de données correspond à ce cas puisque les valeurs d'aplatissement et de symétrie sont respectivement de 1,188 et de -0,844.

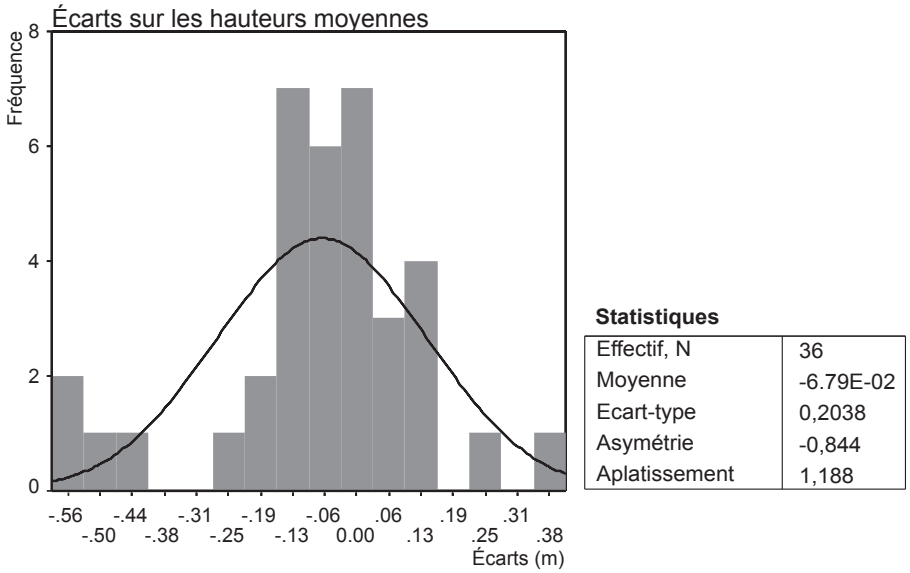


Figure 2-32
Répartition des écarts entre hauteurs moyennes réelles et hauteurs moyennes modélisées des sections mobilisables suivant une loi normale

Les hauteurs moyennes modélisées ont tendance à sous-estimer les hauteurs moyennes réelles d'environ 6 cm, alors que l'écart type a une valeur de l'ordre de 20 centimètres (**Cf. Fig. 2-33**). Pour conserver une homogénéité avec l'estimation des autres erreurs, notamment celles des mesures photogrammétriques, nous avons considéré une erreur de plus ou moins un écart-type autour de la moyenne (correspondant à 68,5% des valeurs) : de –27 à +15 cm. Donc l'erreur sur les hauteurs moyennes calculées à partir de quatre points de mesure est inférieure à plus ou moins 27 cm.

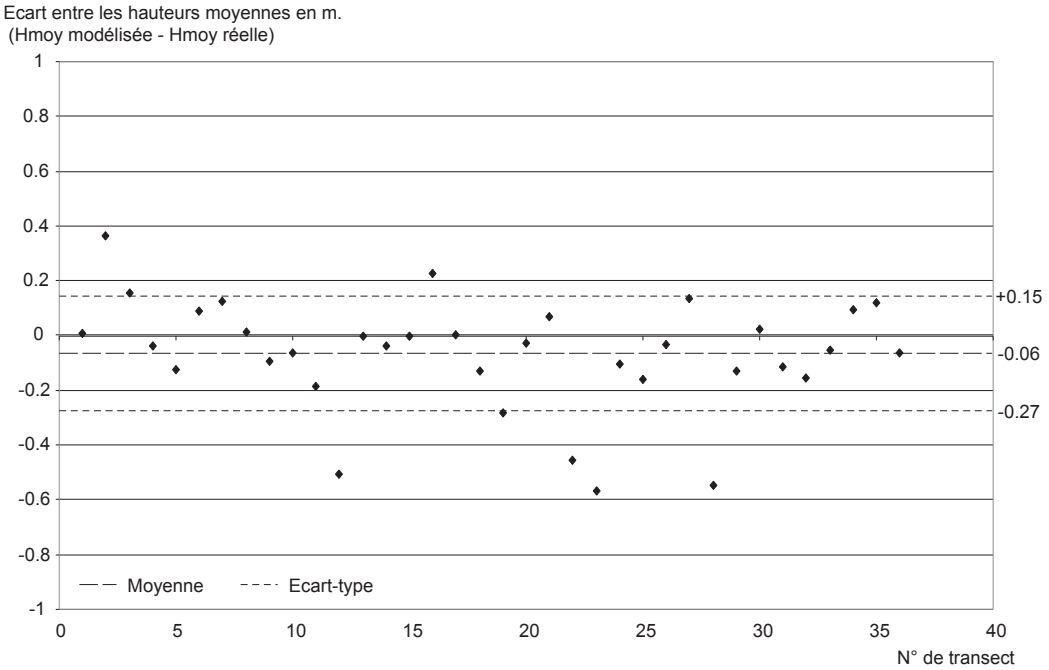


Figure 2-33
Test sur les résidus de la hauteur moyenne calculée

3.2. Equidistance entre les profils en travers

Pour augmenter l'équidistance entre les profils en travers, nous avons supprimé un transect sur deux à partir de l'échantillonnage initial (équidistance de dix mètres) afin d'obtenir un échantillonnage moins dense, et nous avons comparé les résultats sur le calcul des volumes. Cette opération a été réitérée plusieurs fois en diminuant ainsi le nombre de transects. On observe tout naturellement des erreurs de mesure croissantes avec l'accroissement de la distance entre les profils en travers.

La **figure 2-34** synthétise les résultats concernant la précision sur les volumes de cet échantillonnage systématique, pour un tronçon du torrent du Manival entre les barrages "RTM" n°47 et n°46 vers 680 mètres d'altitude. Les résultats obtenus indiquent des incertitudes maximales de l'ordre de :

- 0,1 % pour 12 profils disposés tous les 20 m,
- 2 % pour 6 profils espacés tous les 40 m,
- 25 % pour 3 profils distants de 80 m chacun, incertitude pouvant être réduite à 15 % si l'on ne prend pas en compte le transect situé sur un seuil artificiel, peu représentatif.

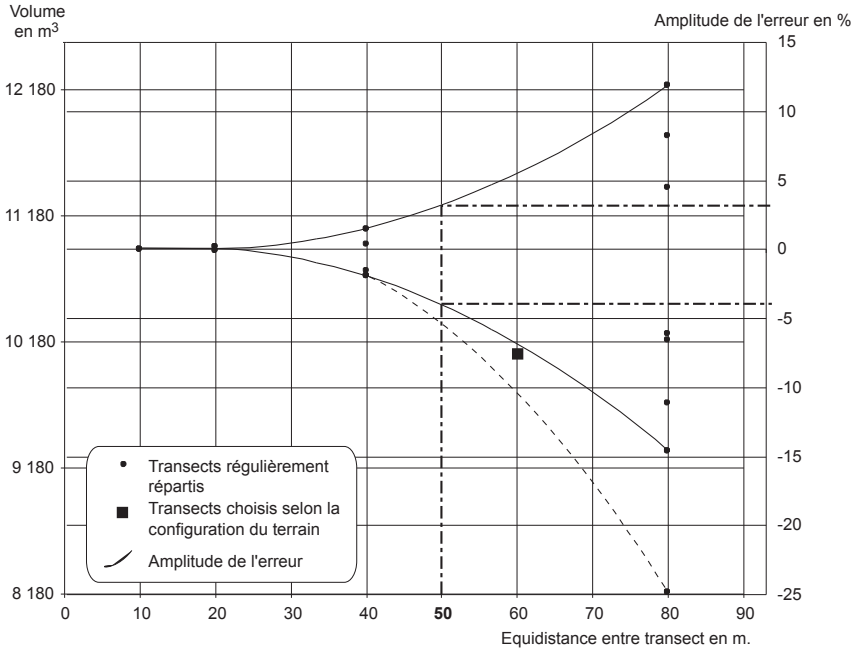


Figure 2-34
Impact de l'équidistance des transects sur l'estimation des volumes (en pointillés réguliers, utilisation de transects mesurés sur des seuils artificiels en béton ; en pointillés irréguliers, valeurs retenues)

Nous avons également effectué un échantillonnage empirique tenant compte de la configuration du terrain, chaque transect représentant des biefs qui nous semblaient homogènes. L'incertitude est alors de 8 % pour 4 profils retenus ; le graphique de la **figure 2-34** montre que cet échantillonnage empirique ne semble pas améliorer la précision sur les volumes calculés. Au vu de l'ensemble de ces résultats, nous avons choisi de conserver une équidistance de 50 mètres entre les profils en travers ce qui correspond à une qualité de mesure acceptable puisque l'incertitude atteint alors environ 4,5 % (**Cf. Fig. 2-34**). Plus en amont dans le chenal du Manival, cette distance maximum de 50 mètres a été réduite en fonction des ruptures majeures du profil en long, en particulier les seuils naturels ou artificiels, afin de respecter l'homogénéité de chaque bief, représenté par un profil en travers. De plus, cette distance a permis une utilisation optimale des appareils de topographie utilisés avec des visées à courte distance qui seront toujours inférieures à 25 mètres, du fait des stations intercalées à mi-distance entre les transects.

Nous avons donc retenu une équidistance entre les profils en travers d'au maximum 50 mètres, distance qui a été réduite en fonction des singularités créées par les ruptures de pente dans le profil en long (seuils), afin d'obtenir des résultats raisonnablement acceptables au regard de la précision sur les volumes (de l'ordre de 4,5 %).

3.3. Calcul de volumes par la méthode des casiers sédimentaires

A partir des mesures optimisées de la topographie de surface (4 points), des aires de sections de matériaux mobilisables, délimitées au fond par le PTA qui est lui-même calé sur un niveau de référence, PLAN sup. ou PLAN inf., ont pu être calculées.

Pour obtenir des volumes à partir des aires calculées, il suffit de multiplier ces dernières par une longueur. Le profil en travers est représentatif d'un bief homogène du chenal, c'est donc la longueur de ce bief qui doit être prise en compte. Or, si l'on suit le protocole de mesure, chaque station topographique est placée à mi-chemin entre les transects. La longueur correspond alors à la distance entre les stations situées de part et d'autre du profil en travers (**Cf. Fig. 2-35**), et le volume d'un casier sédimentaire se calcule de la manière suivante :

$$V_i = S_i \cdot l_i \quad \text{ou} \quad V_i = h_i \cdot \omega_i \cdot l_i \quad (\text{car } S_i = h_i \cdot \omega_i) \qquad (2\text{-}10)$$

Avec :

V_i, le volume du casier i (en m^3),

S_i, la section délimitée par le PTA et la topographie du profil en travers représentant le casier i (en m^2),

l_i, la longueur du casier i entre deux stations topographiques (en m),

h_i, la hauteur moyenne du casier i ou du profil en travers correspondant (en m),

ω_i, la largeur du casier i ou du profil en travers correspondant (en m).

Le volume sédimentaire total potentiellement mobilisable dans chenal est ensuite obtenu en ajoutant le volume de tous les casiers sédimentaires selon la formule suivante :

$$V = \sum V_i \qquad (2\text{-}11)$$

avec V, le volume total et V_i, le volume de chaque casier (en m^3).

La méthode des casiers sédimentaires est bien adaptée à notre problématique car la faible densité de points de mesure qui ne permet pas d'obtenir un modelé de terrain comme cela peut être le cas lors de l'élaboration d'un MNT, permet cependant de calculer de manière très simple et rapide un état du potentiel sédimentaire stocké dans le chenal torrentiel.

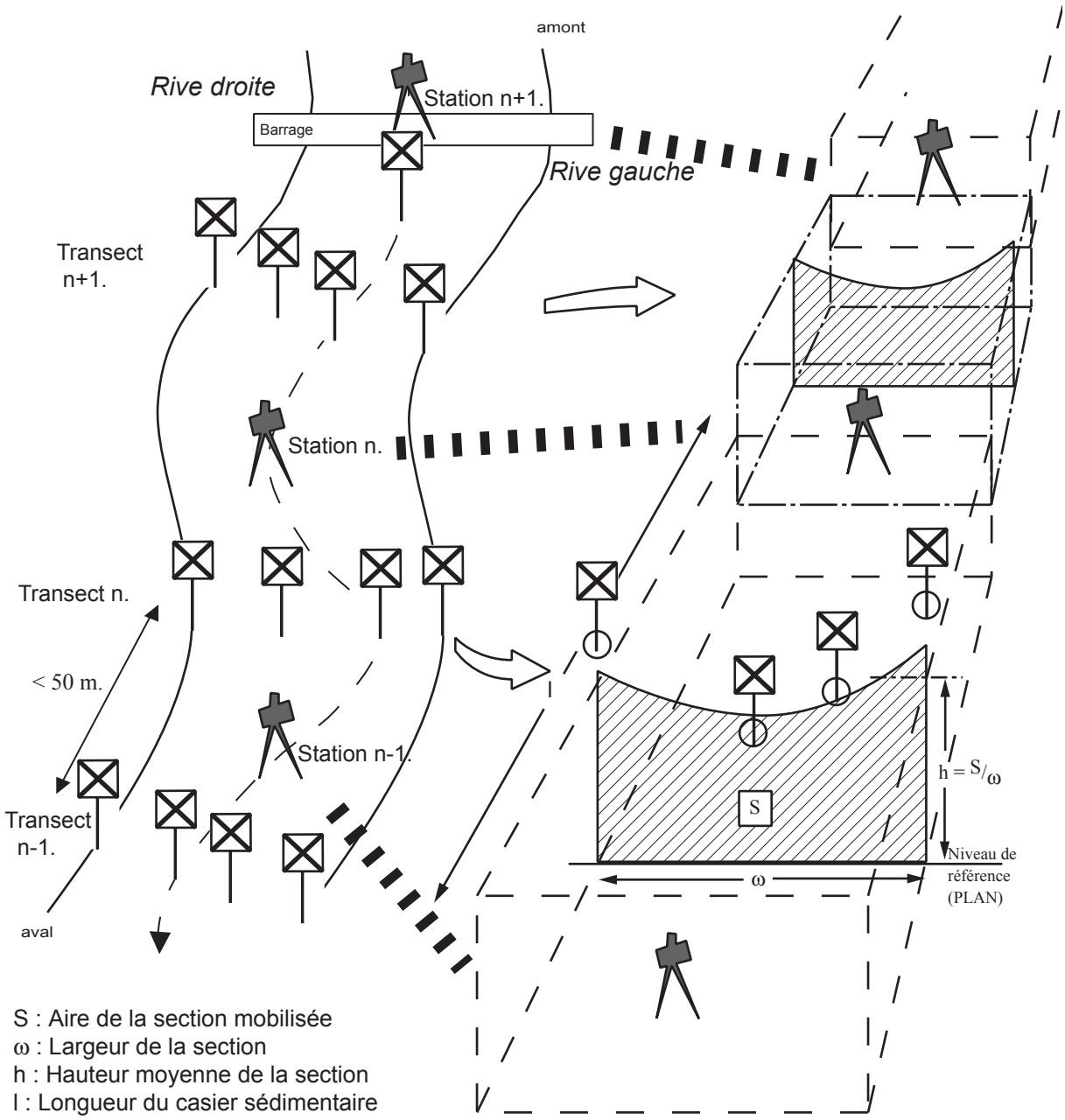


Figure 2-35
Echantillonnage des mesures topographiques et principe de calcul sous forme de casiers sédimentaires des volumes de matériaux potentiellement mobilisables

4. Synthèse de la technique d'échantillonnage mise en œuvre

4.1. Acquisition des données topographiques

Pour l'acquisition des données topographiques, deux outils ont été utilisés : la stéréo-photogrammétrie et le cheminement topographique. Ces différents outils de mesure nous ont permis une analyse à différentes échelles de temps.

A partir de la photogrammétrie sur des photographies aériennes d'archives, un travail diachronique sur 12 états de remblaiement sédimentaire du chenal du Manival, de 1963 à 2000, a été possible.

Le cheminement topographique n'a quant à lui permis qu'un travail synchronique, l'acquisition des données de terrain étant nécessairement contemporaine à l'étude. Toutefois, lorsque l'on dispose de données de terrain mesurées par cheminement sur le long terme, elles remplacent avantageusement l'approche photogrammétrique qui s'effectue sur des photographies d'archives de moins bonne qualité.

4.2. Modalités d'échantillonnage

L'objectif d'acquisition des mesures est de pouvoir quantifier le volume de sédiments du chenal potentiellement mobilisable par les plus fortes laves torrentielles, en additionnant des casiers sédimentaires successifs.

Un travail de définition et de localisation dans l'espace (sur le profil en long) de sections mobilisables a été privilégié : forme de la section mobilisable correspondant à un Profil en Travers d'Ablation (PTA) et calage en altitude du PTA. Les tronçons homogènes, que représentent les sections mobilisables, sont des entités spatiales contrôlées par des points durs, naturels ou artificiels, dans le profil en long. En fonction des connaissances scientifiques limitées, des hypothèses ont été formulées sur chacun des profils :

- Les profils en travers (PTA) ont un profil d'érosion en forme de "U",
- Le profil en long (PLAN) détermine l'altitude du fond de chaque PTA. Il est défini par deux profils enveloppe qui délimitent le niveau d'érosion maximum : les Profils en Long d'Ablation de Niveau supérieur et inférieur (PLAN sup. et PLAN inf.).

Chaque section mobilisable a alors pu être calculée par l'aire comprise entre le PTA et la topographie de surface.

4.3. Optimisation de la collecte d'information topographique

Même si elle était très précise, l'importante base de donnée topographique de départ (MNT), trop longue à acquérir et trop coûteuse à constituer, était inadaptée à la mise en œuvre d'une technique de calcul visant uniquement à estimer les volumes sédimentaires. Nous avons donc mené un travail pour minimiser la collecte de l'information topographique, quel que soit l'outil utilisé. La réduction du nombre de mesures s'est faite à deux niveaux : les profils en travers, en diminuant le nombre de points les constituant d'une part ; et le profil en long, en augmentant la distance entre les transects d'autre part.

Les 19 points représentant au départ la surface précise du profil en travers ont été réduits à 4 points répartis dans le transect de la façon suivante (**Cf. Fig. 2-30**) :

- à la base de la berge en rive droite,
- au niveau le plus bas du profil en travers (talweg),
- au niveau le plus élevé dans la partie médiane du chenal (éloigné des berges de plus de 30% de la largeur totale),
- à la base de la berge située en rive gauche.

A partir de ces quatre points modélisés par une courbe selon la méthode des moindres carrés, et en s'appuyant sur le PTA correspondant, l'aire de la section mobilisable a été intégrée. La qualité de cette modélisation des sections nous satisfait puisque l'ordre de grandeur de l'erreur sur la hauteur moyenne (ou la profondeur) a été estimée inférieure (en écart-type) à plus ou moins 27 centimètres (**Cf. Fig. 2-33**).

Dans le profil en long, la fréquence des transects, qui était de 10 mètres, a été ramenée à 50 mètres avec une erreur sur les volumes estimée à environ 4,5 %. La distance entre les transects a toutefois été réduite lorsque des ruptures de pente importantes ont été rencontrées dans le profil en long, afin de garder des biefs homogènes. Concrètement, ces ruptures sont matérialisées par des seuils naturels ou artificiels dans le chenal torrentiel.

Des points intermédiaires, de station topographique, situés entre les transects successifs ont permis de délimiter la longueur (l_i) de chaque casier sédimentaire (i). La largeur (ω_i) et la hauteur moyenne (h_i) étant par ailleurs définies par la section mobilisable (S_i) du transect représentatif. Le volume de chaque casier (V_i) est alors calculé simplement par la formule *(2-10)* que l'on donne à nouveau ici :

$$V_i = S_i \cdot l_i \qquad \text{ou} \qquad V_i = h_i \cdot \omega_i \cdot l_i \qquad (2\text{-}10)$$

La section mobilisable (S_i) est quant à elle délimitée par la topographie de surface et le PTA. Le niveau du fond de ce dernier étant déterminé par sa position sur le PLAN sup. et le PLAN inf. La **figure 2-36** synthétise la démarche méthodologique de calcul de l'état sédimentaire potentiel du chenal torrentiel.

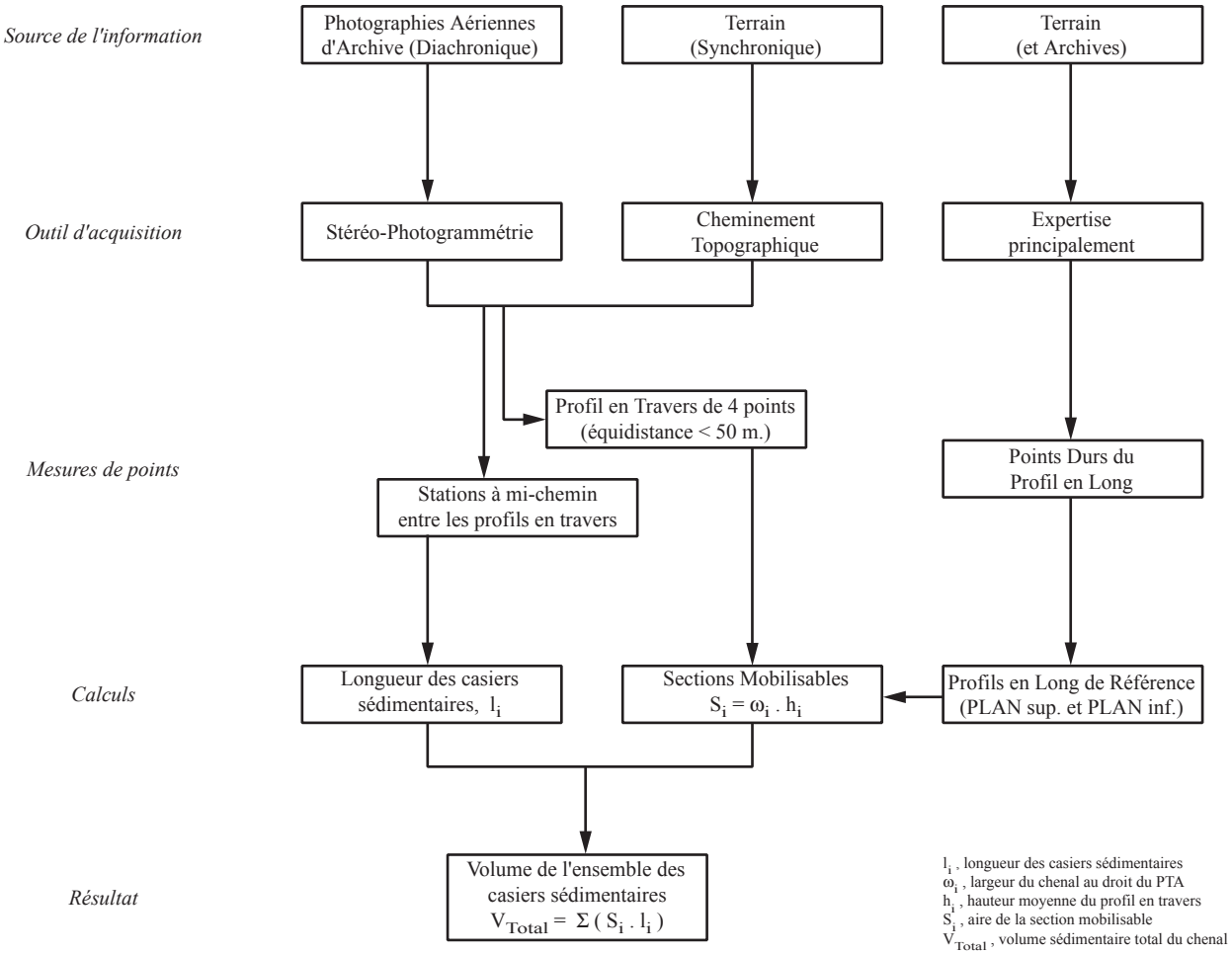


Figure 2-36
Organigramme de la méthode de calcul de l'état sédimentaire potentiel du chenal torrentiel

4.4. Chaînes de traitements pour l'exploitation des données

L'énorme quantité de mesures a entraîné quelques difficultés dans l'acquisition et le traitement des données. Pour donner un ordre d'idée, le nombre de points relevés en coordonnées x, y et z sur le torrent du Manival au cours de notre travail s'élève à 11 000 valeurs.

Le caractère répétitif des mesures impose certaines contraintes pour éviter que le traitement ne devienne fastidieux. Les outils d'automatisation nécessitent une grande rigueur dans l'ordre d'acquisition. Pour le torrent du Manival, les mesures ont été faites systématiquement de l'aval vers l'amont et de la rive droite vers la rive gauche. Sur le terrain, nous avons adapté un ordinateur portatif *Psion Workabout* en carnet électronique de terrain connecté aux instruments de mesure, afin de rendre plus rapide la collecte des données. Ces dernières ont ensuite été transférées dans un ordinateur, à l'aide d'outils d'exportation que nous avons programmés pour effectuer le traitement des mesures.

Le traitement des données a nécessité le développement d'outils spécifiques, macro-commandes et feuilles de calculs, qui rendent semi-automatiques les calculs de l'ensemble de la chaîne de traitement suivants différentes étapes :

- outils de mise en forme des données pour passer des mesures d'angles et de distances à des coordonnées topographiques (macros-commandes) ;
- outils de calcul du PLAN sup. et des points d'inflexions permettant de déterminer le PLAN inf. (feuilles de calcul) ;
- outil de calcul de l'aire des sections mobilisables en fonction des coordonnées topographiques et des PLAN sup. et PLAN inf. (macro-commande) ;
- outil de calcul des longueurs des casiers sédimentaires à partir des coordonnées des stations topographiques (feuille de calcul).

Pour effectuer le calcul des volumes, un tableau de synthèse de dix colonnes (**Cf. Tab. 2-4**) a ensuite été créé pour chaque profil de référence PLAN sup. et PLAN inf. Pour les calculs détaillés et les différents outils utilisés, le lecteur pourra se reporter aux annexes. Le volume total est obtenu en faisant la somme des valeurs de la colonne 10, c'est-à-dire de tous les casiers sédimentaires.

La colonne 8, hauteur moyenne, même si elle ne participe pas directement au calcul des volumes, permet toutefois de comparer l'état de secteurs différents du chenal puisqu'elle représente une valeur spécifique de la hauteur du stock sédimentaire accumulé dans le casier. C'est d'ailleurs sur cette valeur spécifique que nous avons estimé l'erreur de la modélisation d'un profil en travers avec quatre points de mesure.

Le pourcentage d'erreur lié au résultat final est variable suivant les torrents, en particulier à cause de la profondeur du PLAN, variable d'un torrent à l'autre. Si le PLAN se situe à dix mètres de profondeur, une erreur de 20 centimètres représentera 2 %, alors que pour une profondeur d'un mètre cette même erreur représentera 20 %. Pour donner un ordre de grandeur de l'erreur globale sur le volume total, nous avons donc utilisé un exemple concret de torrent, en s'appuyant sur les valeurs de hauteurs spécifiques. On a considéré un chenal torrentiel du type du Manival : avec une largeur moyenne de 15 mètres et une longueur de 2 800 mètres, composé de 70 profils en travers, et pour lequel l'événement torrentiel de référence (volume total) serait d'environ 50 000 mètres cubes. Chaque transect est donc représentatif en moyenne de 40 mètres linéaires de chenal. Lors d'un cheminement il existe une forte probabilité que les erreurs identiques de chaque visée, qui ne sont pas systématiques, s'annulent. En topographie, pour calculer l'erreur globale, la formule de l'erreur quadratique moyenne est généralement utilisée [Levallois, 1960]. Nous avons appliqué ce principe aux volumes des casiers sédimentaires en utilisant la formule suivante :

$$E = \varepsilon \cdot \sqrt{n} \qquad (2\text{-}12)$$

avec E, ε, et n, respectivement l'erreur globale, l'erreur de chaque tronçon (erreur potentiellement identique), et le nombre de tronçons.

Si nous considérons notre exemple et une erreur de 27 centimètres sur la hauteur moyenne des sections modélisées (**Cf. Fig. 2-33**), on obtient une erreur en volume de 162 m^3 par casier :

$$\omega_i \text{ X } l_i \text{ X } 0{,}27 = 15 \text{ X } 40 \text{ X } 0{,}27 = 162 \qquad (2\text{-}13)$$

soit le calcul de l'erreur globale suivant la formule *(2-12)* (en m^3) :

Tableau 2-4
Tableau de synthèse des différents calculs intermédiaires pour obtenir le volume des sédiments mobilisables (colonne 10)

1 **N°** Transect	2 Distance sur PL* **D**	3 Alt. Z du PLAN **ZPLAN**	4 Alt. Z du PL* **ZPL**	5 Hauteur par rapport au PLAN, **dz**	6 Largeur **ω**	7 Aire de la Section **S**	8 Hauteur moy. ou spécifique par m^2 **Hmoy**	9 Longueur **L**	10 **Volume V**
Utilisation du fichier de données topographiques		*Utilisation des fichiers de données topographiques et de PLAN*		*Formule Col.4-Col.3*	*Utilisation de la macro LargueuretAireSection*		*Formule* $\frac{Col.7}{Col.6}$	*Feuille de calcul de L*	*Formule Col.7 X Col.9*

*PL : profil en long

$$E = 162 \times \sqrt{70} = 1\,355 \qquad (2\text{-}14)$$

Il faut ajouter à ce résultat les 4,5 % d'erreur (**Cf. Fig. 2-34**) sur le volume liée à une équidistance entre les profils en travers de 50 mètres (bien que dans la zone amont du chenal elle soit souvent inférieure), soit 2 250 m^3 :

$$\frac{4,5}{100} \times 50\,000 = 2\,250 \qquad (2\text{-}15)$$

On obtient donc le total suivant :

$$1\,355 + 2\,250 = 3\,605 \qquad (2\text{-}16)$$

qui est l'erreur globale sur le volume de 3 605 m^3, ce qui représente environ 7 % du volume total (50 000 m^3). Cette erreur est très satisfaisante mais elle ne concerne que la méthode d'échantillonnage topographique.

Nous disposons donc maintenant d'une méthodologie de mesure optimisée. Pour un chenal torrentiel comme celui du Manival, en amont de la plage de dépôt, environ 400 points de mesure topographique suffisent. Il s'agit d'un profil en long et de profils en travers fortement "allégés", composés de quatre points seulement. Les résultats sont acceptables puisque les erreurs liées à cette méthodologie d'échantillonnage sont de l'ordre de 7% sur le volume total. Par contre, l'incertitude actuellement importante du PLAN lié au manque de connaissances scientifiques sur ce point, nous a obligé à donner une fourchette de deux valeurs encadrant le volume réel, ce qui peut diminuer fortement la précision du résultat. Cette méthodologie est bien adaptée au milieu étudié et aux outils topographiques utilisés. Les mesures directes de terrain, menées avec un télémètre laser et une boussole électronique, sont suffisamment précises mais ne peuvent être que contemporaines. Quant aux mesures photogrammétriques effectuées sur des photographies aériennes d'archives, elles ont permis d'établir des états sédimentaires passés, avec une incertitude de l'ordre de 8% sur le volume total. Grâce à ce panel d'outils, l'étude approfondie du fonctionnement de la dynamique sédimentaire au sein du bassin versant du Manival peut être menée, afin de déterminer quelques indicateurs essentiels que l'on puisse utiliser dans un modèle simple mais efficace de prédiction des volumes sédimentaires extrêmes transportés par le torrent. C'est l'objet de la troisième partie de cette thèse.

TROISIEME PARTIE
Dynamique sédimentaire en milieu torrentiel : étude détaillée du bassin versant du Manival

1. Evolution de l'état de remplissage du chenal de 1963 à 2000
2. Fonctionnement et apports sédimentaires dans le bassin de réception
3. Synthèse : prise en compte des phases d'instabilité et détermination d'indicateurs géomorphologiques pertinents

Sur des bases géomorphologiques, nous avons présenté dans la première partie de cette thèse les concepts majeurs du fonctionnement sédimentaire des bassins versants mettant en avant les processus de recharge et les rythmes de stockage et déstockage des matériaux. Pour les torrents que nous étudions, le lieu privilégié de cette accumulation sédimentaire est le chenal qui permet de libérer de grandes quantités de matériaux à l'occasion des laves torrentielles. Dans cette même partie, la description des modèles disponibles en ingénierie torrentielle pour estimer le volume sédimentaire des laves a montré que la dynamique sédimentaire au sein du système torrentiel était trop peu prise en compte. Le transit sédimentaire s'effectuant le long du chenal est alors généralement traité comme une boite noire, seules la production détritique des versants et/ou la fourniture sédimentaire en sortie de bassin versant étant étudiées. Dans la seconde partie de ce travail, la méthode de mesure a été présentée et a permis d'établir la quantification sédimentaire du chenal torrentiel. A l'aide d'outils topographiques, la stéréo-photogrammétrie et la topométrie de terrain, plusieurs états sédimentaires peuvent être calculés pour un même torrent permettant ainsi une analyse diachronique de l'évolution du niveau de remplissage du chenal.

A travers l'exemple du bassin versant du Manival, l'objectif de cette troisième partie est de mieux comprendre la dynamique sédimentaire des lits torrentiels, élément primordial trop souvent négligé dans les modélisations globales, afin de dégager les indices essentiels qui ont servi à estimer le volume d'une lave torrentielle extrême.

Les deux premiers chapitres présentent les facteurs explicatifs de l'instabilité du système torrentiel : l'accumulation sédimentaire menant à une surcharge qui crée une situation d'instabilité, et l'influence des facteurs hydrométéorologiques sur celle-ci. La recharge sédimentaire au sein du bassin versant a été appréhendée d'une part, par l'étude diachronique de l'état de remplissage du chenal, et d'autre part, par l'étude de la recharge sédimentaire provenant du bassin de réception. Pour ce dernier point, nous avons procédé à la spatialisation des zones de fourniture sédimentaire pour le chenal en prenant en compte les notions de connectivité et de taux de production relatifs, ainsi qu'au suivi d'un ravin en position d'interface entre versant et chenal. Puis le dernier chapitre fait la synthèse de l'étude sédimentaire menée au Manival en tentant d'établir tout d'abord des bilans sédimentaires, basés principalement sur les variations de stock sédimentaire du chenal, et en montrant ensuite l'effet des micro-laves torrentielles transportant fréquemment les matériaux, avant de mettre en relief le rôle de la pente, principal indicateur géomorphologique du fonctionnement sédimentaire.

1. Evolution de l'état de remplissage du chenal de 1963 à 2000

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les différents états sédimentaires correspondant à une photographie du niveau de remplissage du chenal pour les douze dates étudiées. Puis nous nous intéressons aux évolutions du bilan sédimentaire entre chacune de ces dates. Les variations des volumes de sédiments du chenal constituent un élément essentiel dans l'élaboration de bilans sédimentaires que nous aborderons dans le chapitre de synthèse à la fin de cette même partie.

1.1. Résultats sur les volumes potentiels de sédiments stockés dans le chenal

Douze séries de photographies aériennes d'archives, d'échelles et de qualité variables, couvrant la période de 1963 à 2000 (**Cf. Tab. 2-2**), ont pu être traitées, en utilisant la méthodologie de mesure détaillée dans la seconde partie (quantification de l'état sédimentaire du chenal torrentiel) et la stéréo-photogrammétrie comme outil topométrique. Les méthodes de calcul basées sur le suivi d'une succession de casiers étagés sur tout le linéaire du torrent (**Cf. Fig. 2-33**), ont permis d'estimer le volume de sédiments accumulé dans le chenal et potentiellement disponible pour une lave torrentielle.

1.1.1. Résultat global des états sédimentaires du chenal

Le volume de chaque casier est calculé simplement en multipliant la largeur par la longueur et la hauteur (ou profondeur) moyenne (**Cf. Formule *2-10***). Rappelons que les deux premiers termes, largeur et longueur, sont définis par les mesures de la topographie de surface, alors que la hauteur moyenne est plus difficile à déterminer. Cette dernière est estimée sur la base de deux hypothèses de Profil en Long d'Ablation de Niveau supérieur et inférieur (PLAN sup. et PLAN inf.), encadrant le niveau d'ablation réel atteint par une crue torrentielle extrême.

Pour chaque date, la **figure 3-1** présente les volumes potentiels disponibles dans le chenal en amont de la plage de dépôt, correspondant au bassin versant étudié. Trois valeurs sont proposées : les volumes en fonction du PLAN sup. (hypothèse minimaliste), du PLAN inf. (hypothèse maximaliste), et une valeur médiane de ces volumes qui représente un niveau d'ablation intermédiaire entre le PLAN sup. et le PLAN inf.

Les résultats pour l'hypothèse minimaliste ont parfois des valeurs négatives. Bien que cela puisse surprendre, ce type de résultat indique qu'à l'échelle de l'ensemble du chenal, la topographie de surface se trouve sous la ligne du PLAN sup. Celui-ci correspondant à un profil d'équilibre empirique du lit torrentiel, mais pas à un niveau d'ablation maximum réaliste, les résultats même négatifs restent cohérents par rapport aux hypothèses utilisées.

Les valeurs médianes oscillent autour d'une valeur de 100 000 m^3, plus ou moins environ 50 000 m^3, avec des valeurs extrêmes de 266 000 m^3 pour l'hypothèse maximaliste et inférieure à 0 (-30 000 m^3) pour

Date	Volume en amont de la plage de dépôt (bassin versant étudié)		
	Hyp.minimaliste (PLAN sup.)	Hyp.maximaliste (PLAN inf.)	Médiane
1963	25 827	238 991	132 409
1970	-1 560	217 252	107 846
1975	41 231	262 562	151 897
1981	-5 690	181 391	87 851
1984	15 222	193 046	104 134
1985	-3 359	184 083	90 362
1987	-2 365	173 915	85 775
1989	1 295	187 110	94 202
1993	-30 009	157 360	63 676
1996	-19 704	175 262	77 779
1998	-26 667	168 165	70 749
2000	n.c.	n.c.	n.c.
Moyenne	-525	194 467	96 971

Date	Volume en amont du barrage RTM n°30 (bassin de réception)		
	Hyp.minimaliste (PLAN sup.)	Hyp.maximaliste (PLAN inf.)	Médiane
1963	n.c.	n.c.	n.c.
1970	5 103	16 680	10 891
1975	12 323	24 248	18 285
1981	10 732	21 446	16 089
1984	9 453	20 802	15 127
1985	2 582	8 946	5 764
1987	14 712	27 258	20 985
1989	16 580	28 787	22 684
1993	7 332	18 525	12 928
1996	28 389	40 130	34 260
1998	18 763	31 379	25 071
2000	14 467	27 777	21 122
Moyenne	12 767	24 180	18 473

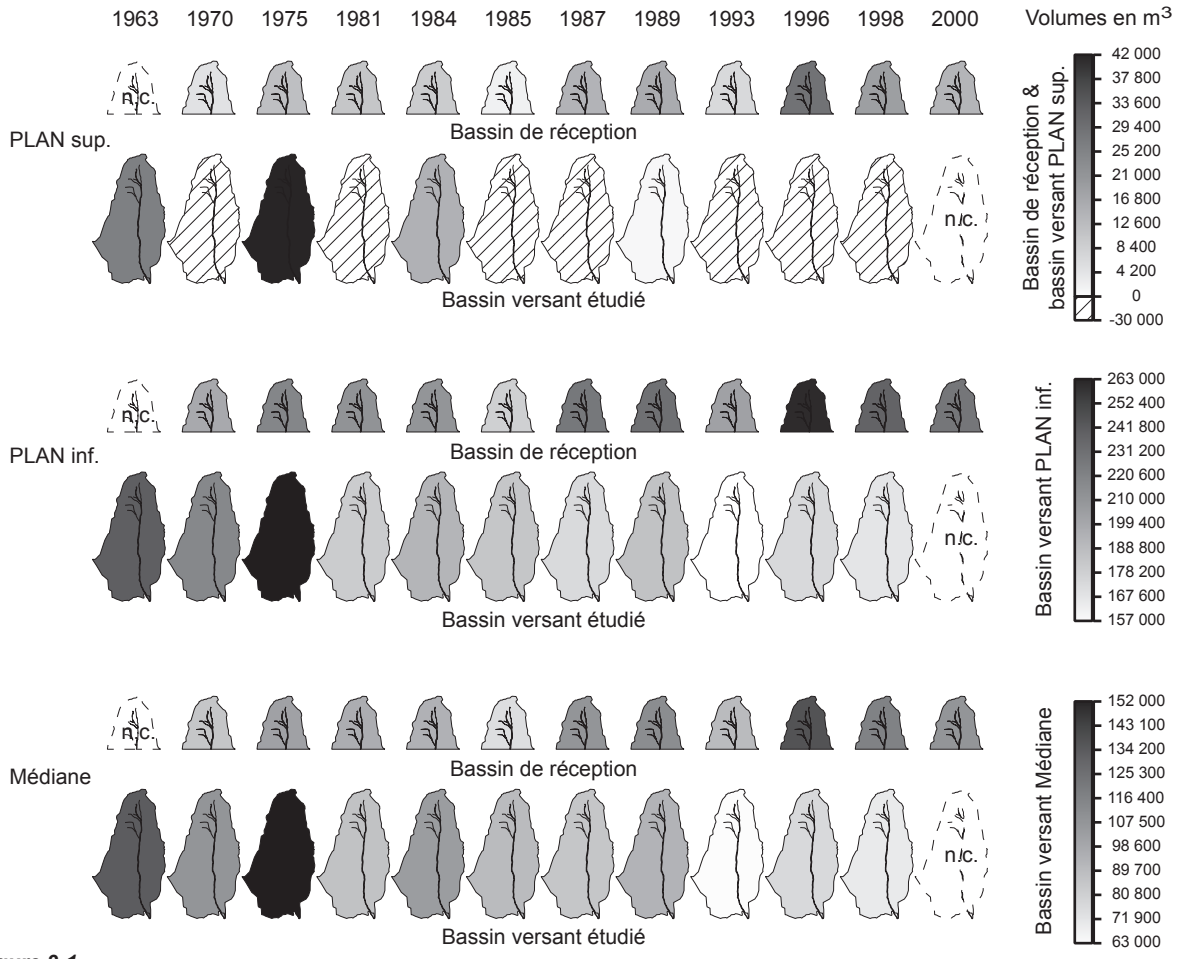


Figure 3-1
Volumes de sédiments potentiellement disponibles dans le chenal du Manival en fonction des différentes hypothèses d'ablation maximale par une lave torrentielle (PLAN sup. et PLAN inf.)

l'hypothèse minimaliste. Ces valeurs sont très élevées si on les compare aux informations historiques, la plus grosse lave torrentielle ayant été estimée à 60 000 m³. Il est intéressant de noter que dans le bassin de réception, en amont du barrage RTM n°30 près de la baraque forestière, les valeurs sont beaucoup plus faibles autour de 18 000 m³ (de 2 600 m³ à 39 000 m³). Mais cette fois, les valeurs sont bien plus basses que celle du volume de la lave torrentielle de référence (60 000 m³). Actuellement ces résultats ne correspondent donc pas à une estimation cohérente du volume qui pourrait être transporté

par une lave extrême. Ils indiquent seulement un volume potentiel stocké dans le chenal et facilement mobilisable par les processus de transport torrentiels.

1.1.2. Etat sédimentaire détaillé du chenal en 1993

Rappelons que l'année 1993 a servi de référence pour le calage des autres dates lors des mesures photogrammétriques (**Cf. Fig. 2-8**), en grande partie en raison de la bonne qualité d'observation de ces photographies aériennes (qualité des photographies, position centrale du bassin versant, visibilité des seuils et du chenal,…). Afin de localiser les différentes zones de plus ou moins grande capacité de stockage sédimentaire, la **figure 3-2** présente, pour l'année 1993, les volumes potentiels de chaque casier sédimentaire du chenal en fonction des deux hypothèses du profil d'érosion maximale de référence, minimaliste (PLAN sup.) et maximaliste (PLAN inf.). Pour comparer les différents casiers qui ont souvent des tailles différentes (largeur, longueur) entre les zones amont et aval du chenal, des volumes spécifiques ont également été calculés. Alors que le volume brut donne une information en valeur absolue, le volume spécifique ou épaisseur moyenne du casier fournit une information relative.

Pour chaque date, deux zones le long du chenal se distinguent nettement :

1) Dans la partie aval, de 0 à 1400 mètres de distance sur le profil en long en amont de la plage de dépôt, l'absence de points durs entre les barrages RTM n°48 et n°47 sur une longue distance (1 000 m) entraîne des forts écarts d'estimation entre les deux hypothèses. Le PLAN inf. est caractérisé par un profil concave vers le haut calculé géométriquement à partir des points durs les plus proches dans le profil en long (**Cf. Fig. 2-22**) ; plus la distance entre les points durs est élevée, plus grand sera l'écart des résultats entre les deux hypothèses. Cet écart peut atteindre 10 à 20 mètres. Dans une moindre mesure, il en est de même entre les barrages RTM n°47 et n°46 distants d'environ 250 mètres l'un de l'autre.
2) Dans la partie amont, au-delà de 1400 mètres de distance en amont de la plage de dépôt, une zone de faibles volumes se distingue nettement, en particulier après la distance 2100 mètres qui correspond à un secteur en gorges, étroit et plus pentu où les dépôts de sédiments sont plus rares et toujours de faible volume. L'écart entre le PLAN inf. et le PLAN sup. est généralement inférieur à 3 mètres.

Même si les hypothèses des PLAN sup. et PLAN inf. sont bien plus imprécises dans la partie aval par rapport à l'amont où les volumes de sédiment sont limités, les volumes potentiels du chenal sont tout de même plus élevés (**Cf. Fig. 3-2**). On observe une relation directe entre d'une part le niveau plus ou moins profond de l'hypothèse de référence (PLAN sup. et PLAN inf.) et d'autre part la distance entre les points durs successifs (seuils naturels ou artificiels) dans le profil en long. Indirectement, il existe un lien avec la pente du torrent puisqu'en amont, lorsque les pentes sont plus fortes, les seuils naturels sont plus fréquents et les aménagements de correction torrentielle sont composés de barrages

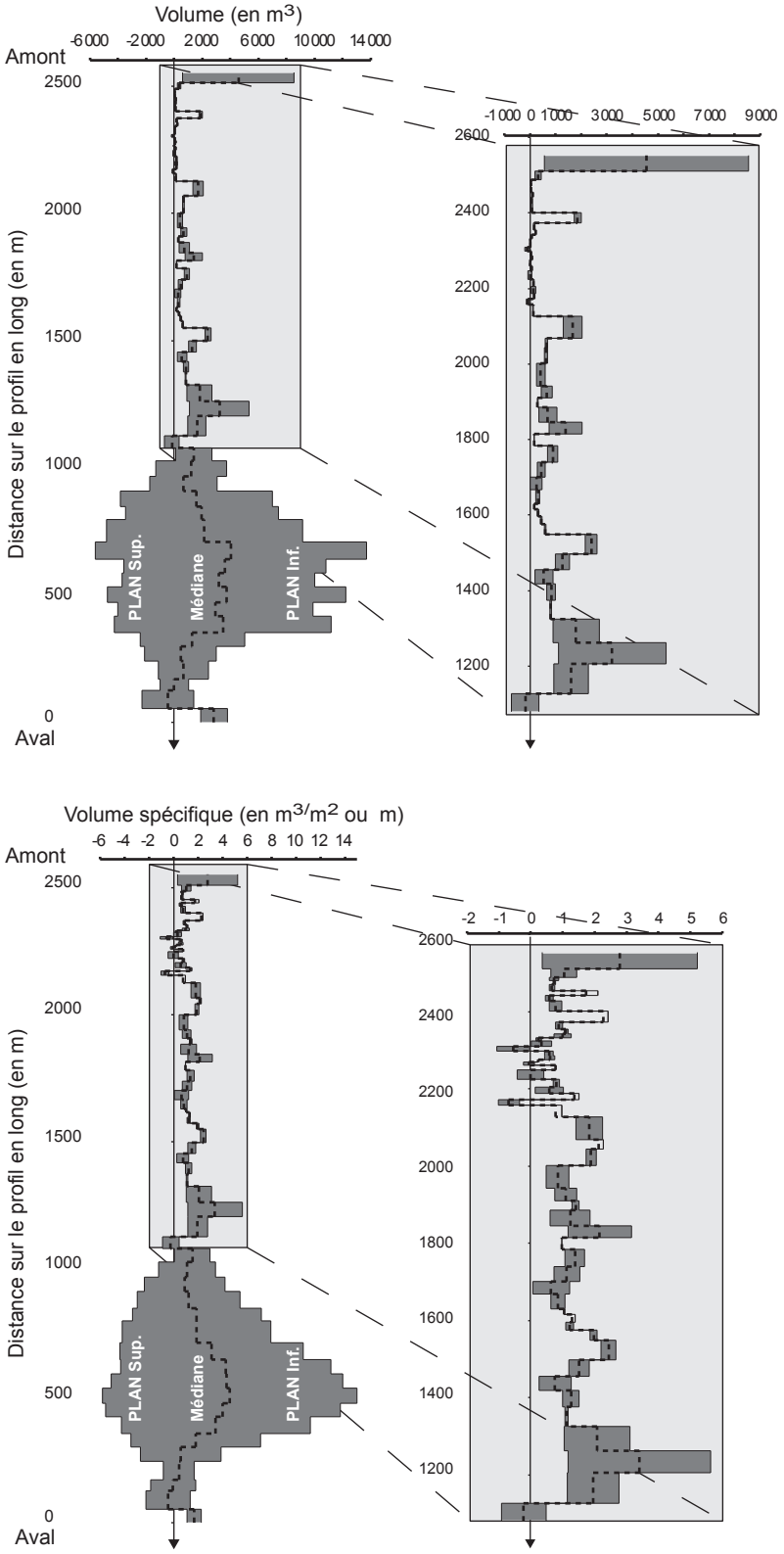


Figure 3-2
Volumes potentiels de sédiments du chenal du Manival en 1993 en fonction des hypothèses du niveau d'ablation maximum, de gauche à droite : PLAN sup., médiane, PLAN inf.

plus rapprochés, alors qu'en aval, où les pentes sont plus faibles, les points durs sont beaucoup plus éloignés les uns des autres.

1.1.3. Comparaison des différents états sédimentaires

Les niveaux des PLAN de référence (PLAN sup., PLAN inf. et médiane) se réfèrent en théorie à un état totalement curé du chenal, mais comme nous venons de le voir, l'incertitude sur le niveau d'ablation réel entraîne des variations parfois importantes entre les différentes hypothèses. Dans un souci de clarté et de lisibilité de l'ensemble des douze dates, nous avons décidé de nous affranchir de ces hypothèses en nous référant à l'état sédimentaire de l'année 1993. Les **figures 3-3** et **3-4** représentent donc l'écart entre les volumes potentiels pour chaque date et ceux de l'année 1993 qui, comme pour le traitement photogrammétrique, sert alors de référence. L'année 1993 est donc représentée sur tous les graphiques au niveau 0.

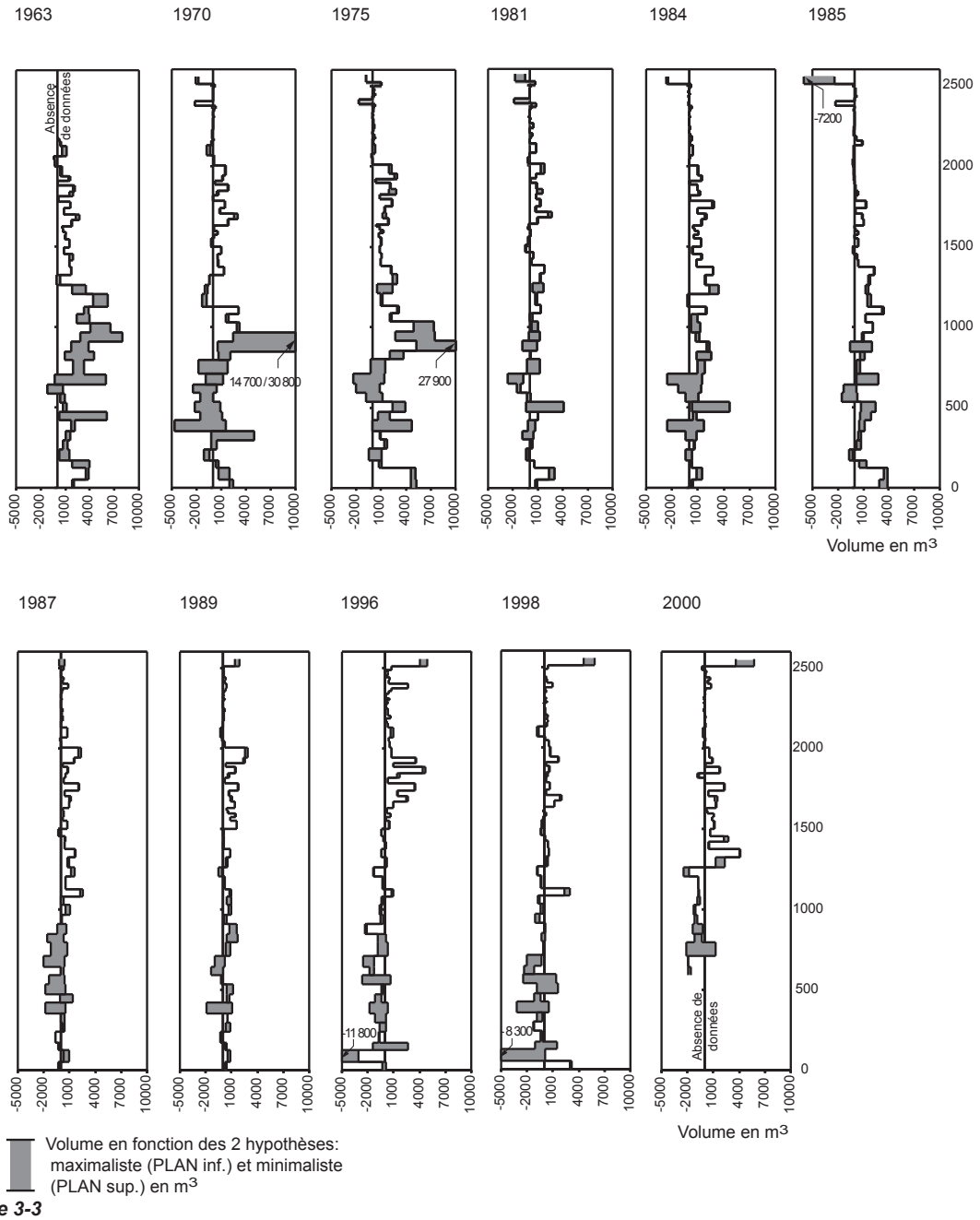


Figure 3-3
Représentation des volumes bruts stockés dans le chenal du Manival pour onze dates de 1963 à 2000, en fonction de ceux calculés pour 1993 (0 représente l'année 1993)

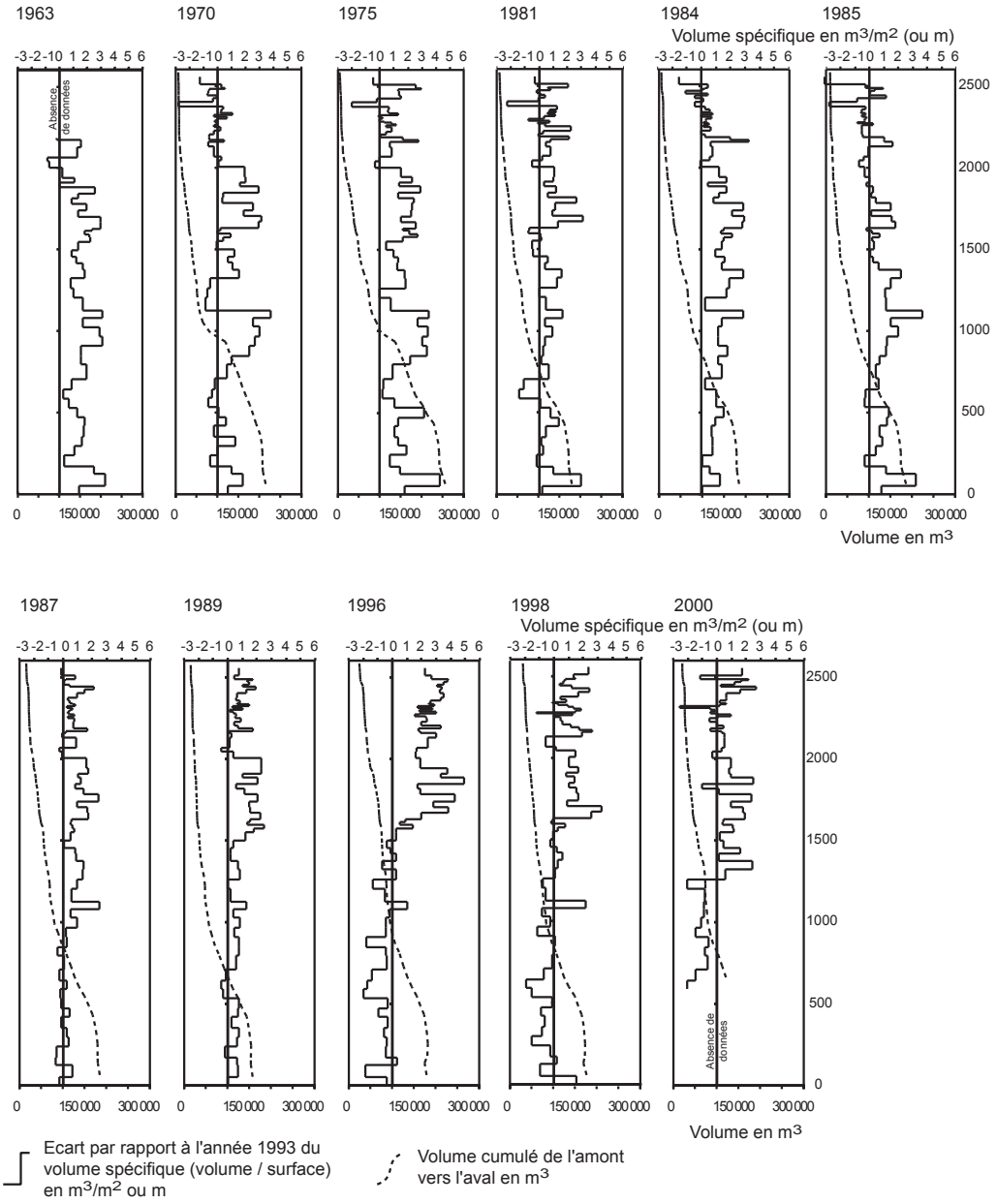


Figure 3-4
Représentation des volumes spécifiques et cumulés stockés dans le chenal du Manival pour onze dates de 1963 à 2000, en fonction de ceux calculés pour 1993

La première figure (**Cf. Fig. 3-3**) présente les volumes bruts, et la seconde (**Cf. Fig. 3-4**) les volumes cumulés et les volumes spécifiques. Ces derniers correspondent au rapport des volumes érodables sur la surface (longueur multipliée par largeur) de chaque casier, ce qui permet une comparaison des volumes quelle que soit la position du casier sur le linéaire du chenal. Cette valeur spécifique est exprimée en m^3/m^2 ou plus simplement en mètre, symbolisant également une épaisseur moyenne de l'accumulation sédimentaire.

L'état sédimentaire de certaines années présente une nette spécificité :

- pour les années 1970, la partie aval du chenal est fortement chargée (distance à la plage de dépôt d'environ 1 000 m), alors que la tendance s'inverse pour les années 1990 ;
- en 1985, le niveau de remplissage dans la partie amont du chenal est particulièrement bas ;
- en 1996, le secteur amont du chenal au-delà de 1500 mètres de distance par rapport à la plage de dépôt est particulièrement rempli par rapport aux autres années.

La première observation, concernant l'évolution du niveau sédimentaire des années soixante-dix aux années quatre vingt-dix, s'explique par un changement de gestion du risque torrentiel par le service de la RTM. Il y a trente ans, les débordements lors des crues étaient favorisés dès l'arrivée sur le cône de déjection afin de forcer l'arrêt des laves torrentielles et le dépôt des matériaux transportés. Cette zone, alors appelée zone de divagation, est actuellement déconnectée du chenal principal, mais de nombreux lits secondaires aménagés de gabions sont encore visibles. De nos jours, tous les débordements sont proscrits car ils sont considérés comme trop dangereux pour les habitants et les infrastructures situées en aval. Le chenal est alors curé mécaniquement et la plage de dépôt a été fermée à l'aval par un ouvrage en béton afin de retenir une grande quantité de matériaux en provenance du torrent. Le niveau sédimentaire dans la zone dite de divagation (distance à la plage de dépôt d'environ 1 000 m) s'est donc logiquement abaissé.

Les deux autres observations peuvent correspondre à un état d'accumulation importante pour 1996, et à une situation post-crue pour 1985, où le seuil d'instabilité a été atteint et les sédiments évacués vers l'aval.

1.2. "Respirations" sédimentaires du chenal : évolutions temporelles

1.2.1. Variations des volumes sédimentaires du chenal par casier sédimentaire

L'observation des variations des volumes de matériaux stockés dans le chenal a pour but l'étude de la "respiration" sédimentaire : la fréquence des dépôts et reprises de matériaux, la localisation d'éventuelles zones de stockages préférentielles.

La **figure 3-5** présente l'évolution des volumes de chaque casier sédimentaire par périodes de temps déterminées par les dates de photographies sur lesquelles ont été faites les mesures. Une certaine alternance entre l'accumulation sédimentaire et l'ablation est visible d'une période à l'autre. La période globale de 1963 à 2000, où les volumes accumulés et les volumes érodés ont été chacun cumulés, forme un graphique relativement symétrique. Certains casiers ont donc une capacité de stockage sédimentaire plus élevée que d'autres, et une plus forte amplitude dans les variations de volume.

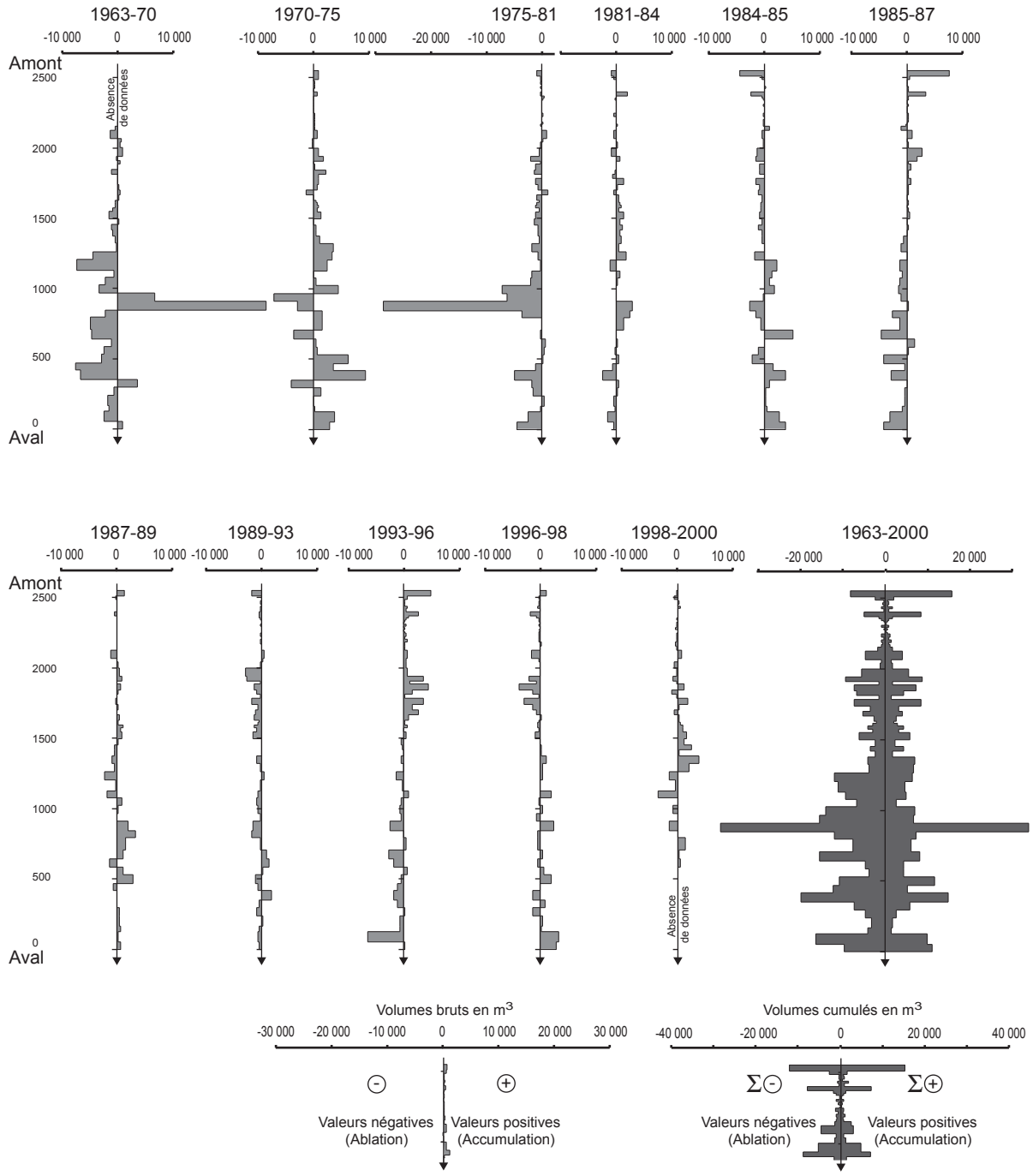


Figure 3-5
Evolution temporelle des volumes de matériaux du chenal par casiers sédimentaires. La période de 1963-2000 représente le cumul des valeurs négatives (à gauche) et des valeurs positives (à droite) de chaque casier

L'une des contraintes majeures est l'intervalle de temps irrégulier de chaque période qui nous a été imposé par la disponibilité des photographies aériennes d'archive utilisées. Ainsi, lorsque les moyennes annuelles des volumes sont comparées (**Cf. Fig. 3-6**), les années soixante-dix prennent une importance moindre alors que c'est le contraire pour les années quatre-vingt, en fonction du plus grand nombre de dates disponibles.

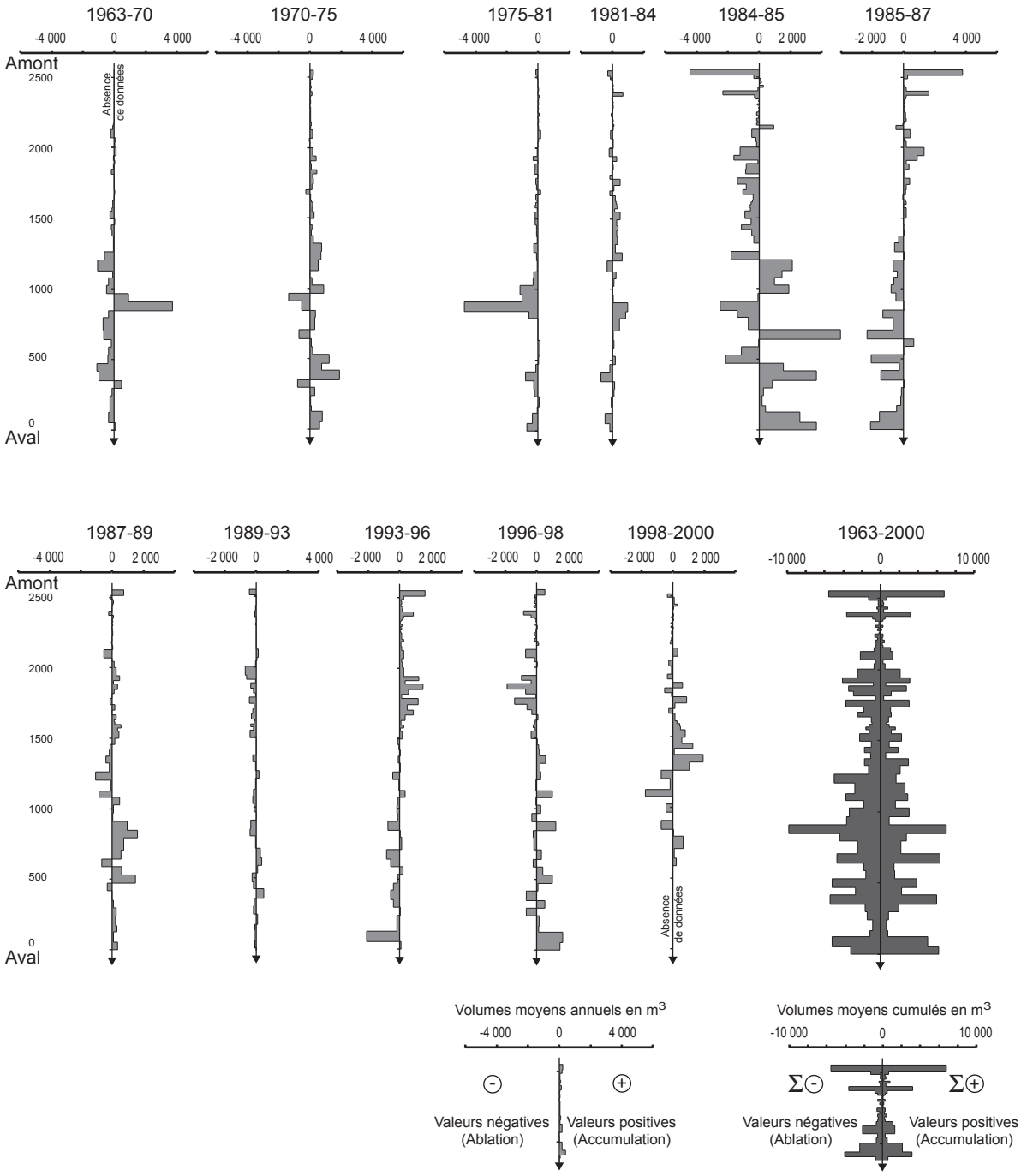


Figure 3-6
Evolution temporelle des volumes moyens annuels de matériaux du chenal par casiers sédimentaires. La période 1963-2000 représente le cumul des valeurs négatives (à gauche) et des valeurs positives (à droite) de chaque casier

Dans l'ensemble les valeurs brutes (**Cf. Fig. 3-5**) sont plus faibles en amont et, en toute logique, les volumes de matériaux augmentent lorsque l'on se situe plus en aval dans le chenal. Comme dans la plupart des cours d'eau, la taille du chenal augmente vers l'aval, avec un accroissement des capacités de stockage ou de déstockage. C'est pourquoi nous avons calculé les volumes spécifiques exprimés en m^3/m^2, rapport du volume brut sur la surface du casier sédimentaire qui permettent de s'affranchir des variations de largeur sur tout le linéaire du torrent (**Cf. Fig. 3-7**). Il apparaît alors que la partie amont du chenal prend une importance considérable avec d'aussi fortes amplitudes sédimentaires que la partie

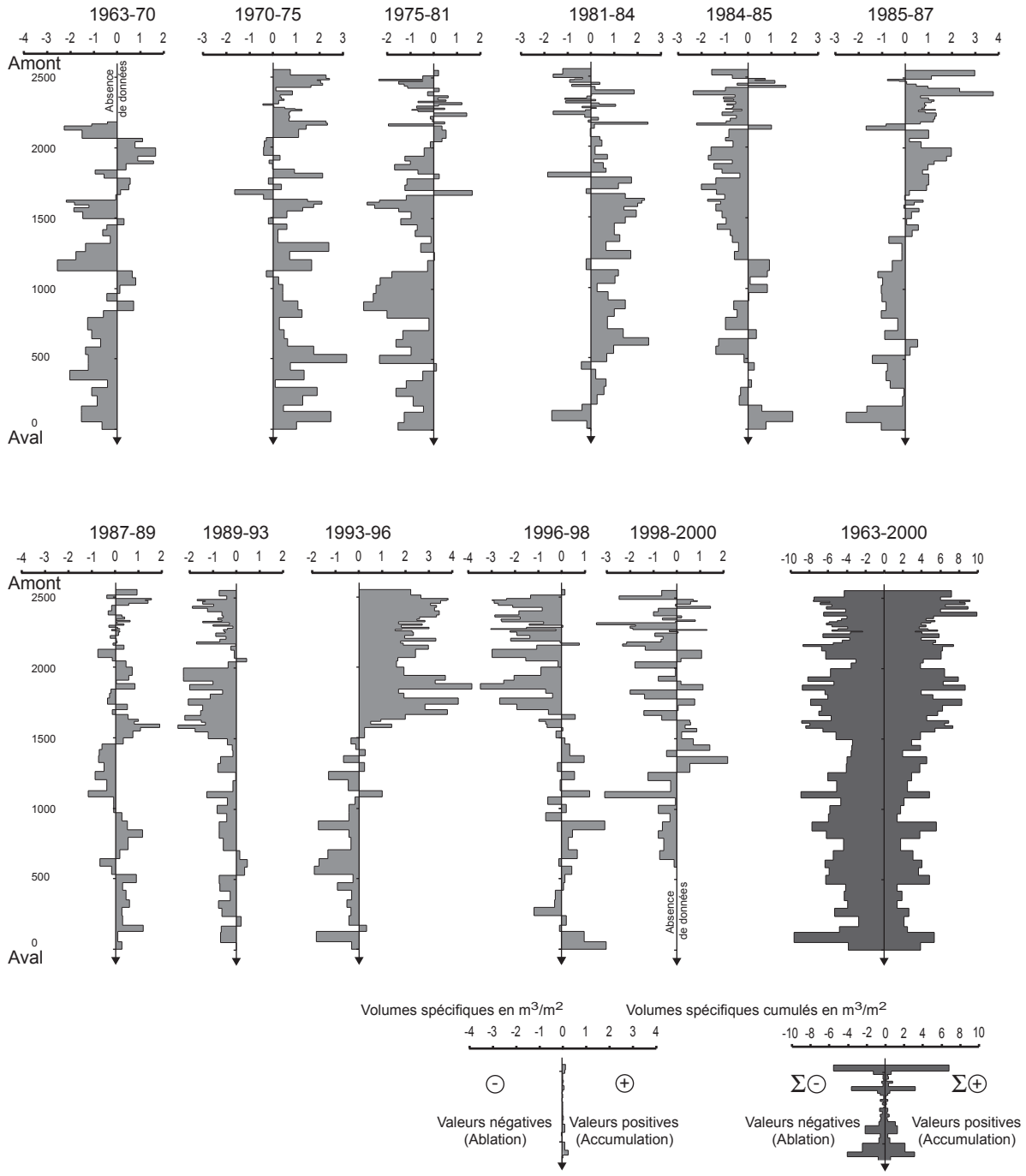


Figure 3-7
Evolution temporelle des volumes spécifiques, ou d'épaisseur moyenne, de matériaux du chenal par casiers sédimentaires. La période 1963-2000 représente le cumul des valeurs négatives (à gauche) et des valeurs positives (à droite) de chaque casier

aval. D'une manière générale sur l'ensemble du chenal, on observe clairement sur la **figure 3-7** une alternance systématique, d'une période à l'autre, entre l'accumulation et la reprise des matériaux que l'on peut qualifier de respiration sédimentaire.

1.2.2. Amplitudes sédimentaires

Le caractère pulsatoire de la migration des matériaux entraîne une modification du remplissage de chaque bief au cours du temps, semblable à une respiration sédimentaire des zones du chenal. L'amplitude correspond à la variation maximale du niveau de remplissage d'un casier sédimentaire au cours du temps, et se calcule donc, à partir des douze dates étudiées de 1963 à 2000, en faisant la différence entre le volume maximum et le volume minimum pour chaque casier, toutes dates confondues (**Cf. Fig. 3-8**). Comme pour les volumes, l'utilisation des amplitudes spécifiques permet de comparer les différents biefs du chenal. La **figure 3-9** présente ces amplitudes spécifiques graphiquement sur le profil en long et en projection cartographique (vue en plan).

Les valeurs les plus importantes, supérieures à 6 mètres, se situent en amont du barrage RTM n°10 et au niveau de la plage de dépôt. Les conditions artificielles de la plage de dépôt favorisent les fortes amplitudes sédimentaires. Les résultats indiquent une zone, en amont du barrage RTM n°10, où le stockage de matériaux peut être important.

Les valeurs les plus faibles, inférieures à 2 mètres, sont localisées dans la zone des barrages RTM n°45 à 42, et entre les barrages RTM n°19 à 11. Cette dernière zone correspond à la partie du chenal en gorge qui n'a pas une grosse capacité de stockage des matériaux.

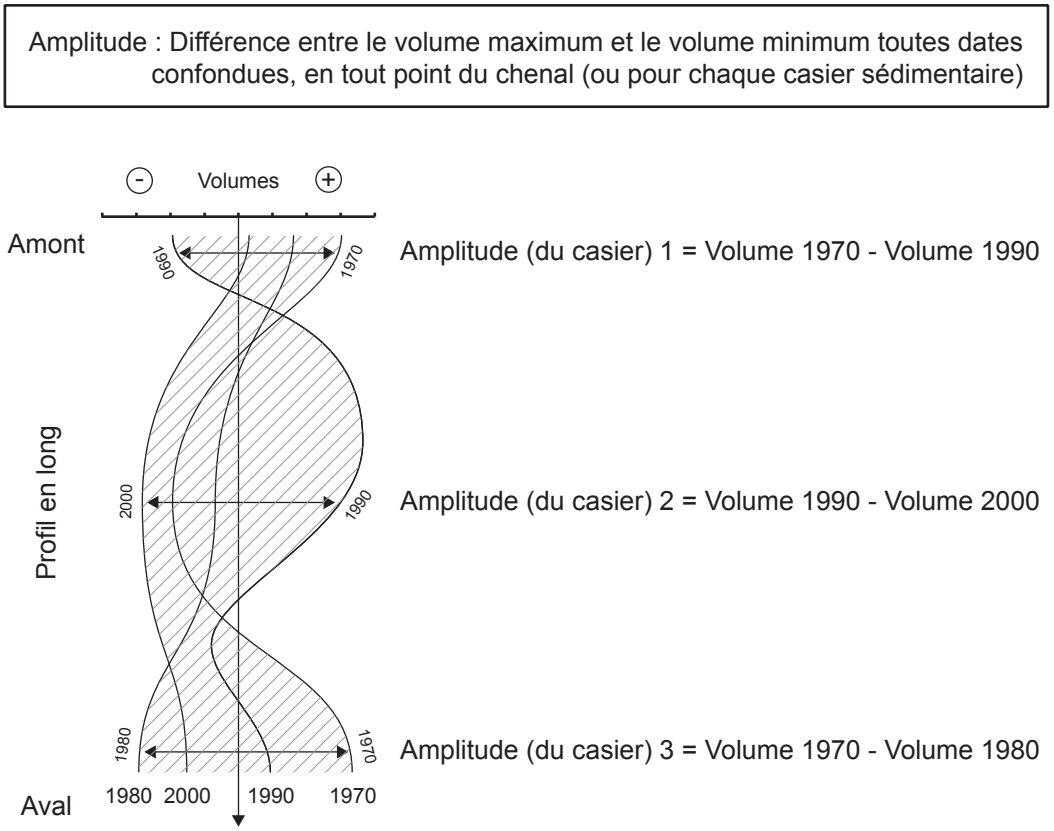


Figure 3-8
Définition de l'amplitude et schéma explicatif de calcul

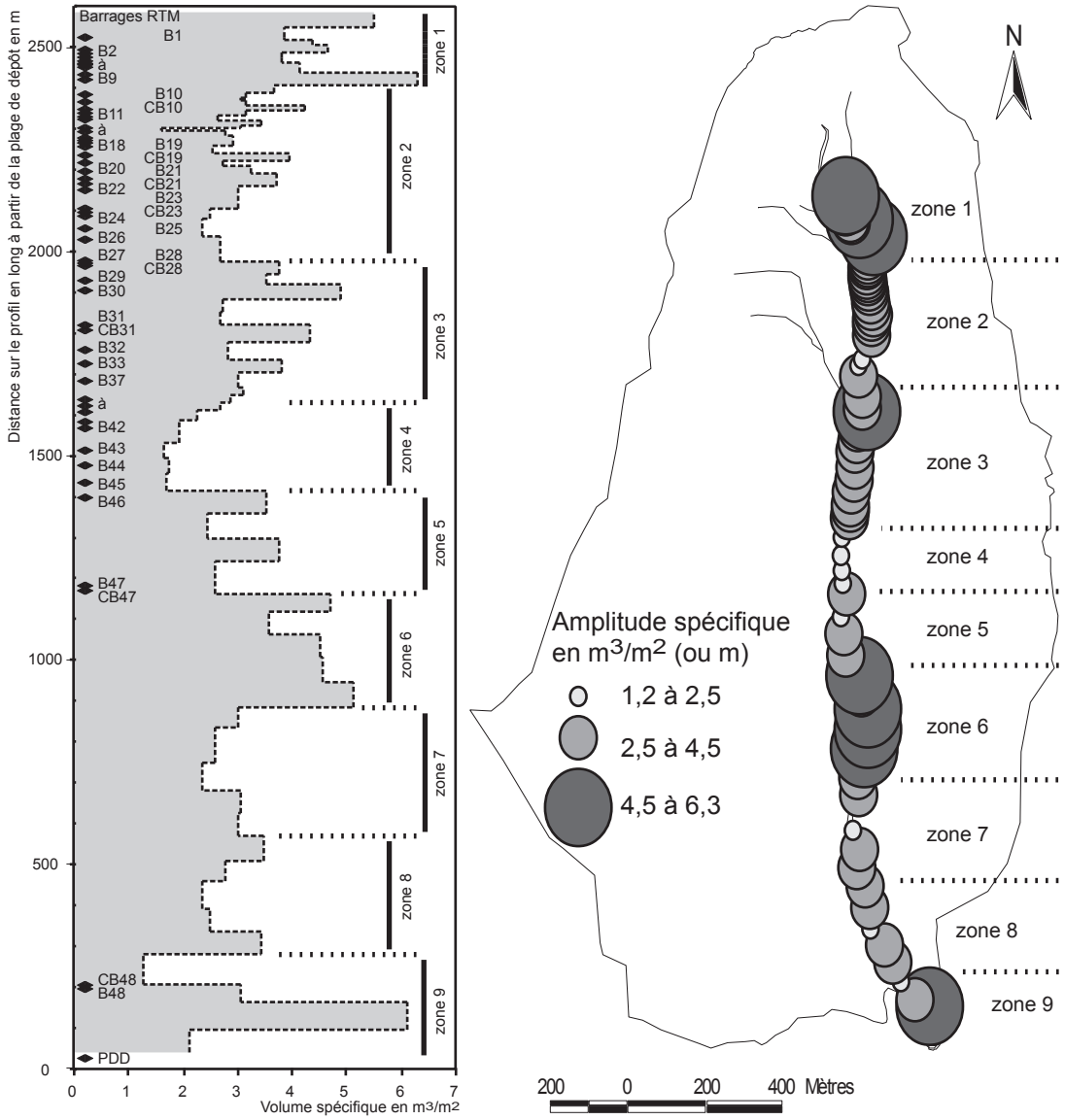


Figure 3-9
Amplitudes spécifiques de chaque bief du chenal du Manival représentées graphiquement (à gauche) et cartographiquement (à droite). Neuf zones d'amplitudes homogènes ont été définies

A partir de ces valeurs, des zones d'amplitude relativement homogènes ont été définies pour simplifier l'analyse et appréhender plus facilement l'évolution sédimentaire des différentes parties du chenal, permettant ainsi de réduire à 9 zones les 70 casiers initialement étudiés (**Cf. Fig. 3-9**). Bien que les zones 7 et 8 aient une capacité de stockage identique, cette subdivision est justifiée par le fait que les rythmes de l'évolution ne sont pas strictement les mêmes comme on peut l'observer sur la figure suivante (**Cf. Fig. 3-10**).

1.2.3. Evolution des volumes pour 9 zones de chenal homogènes

La **figure 3-10** montre les variations de volume sédimentaire du chenal avec les valeurs brutes et avec les valeurs spécifiques. Elle met en relief les fortes variations de l'épaisseur moyenne des matériaux

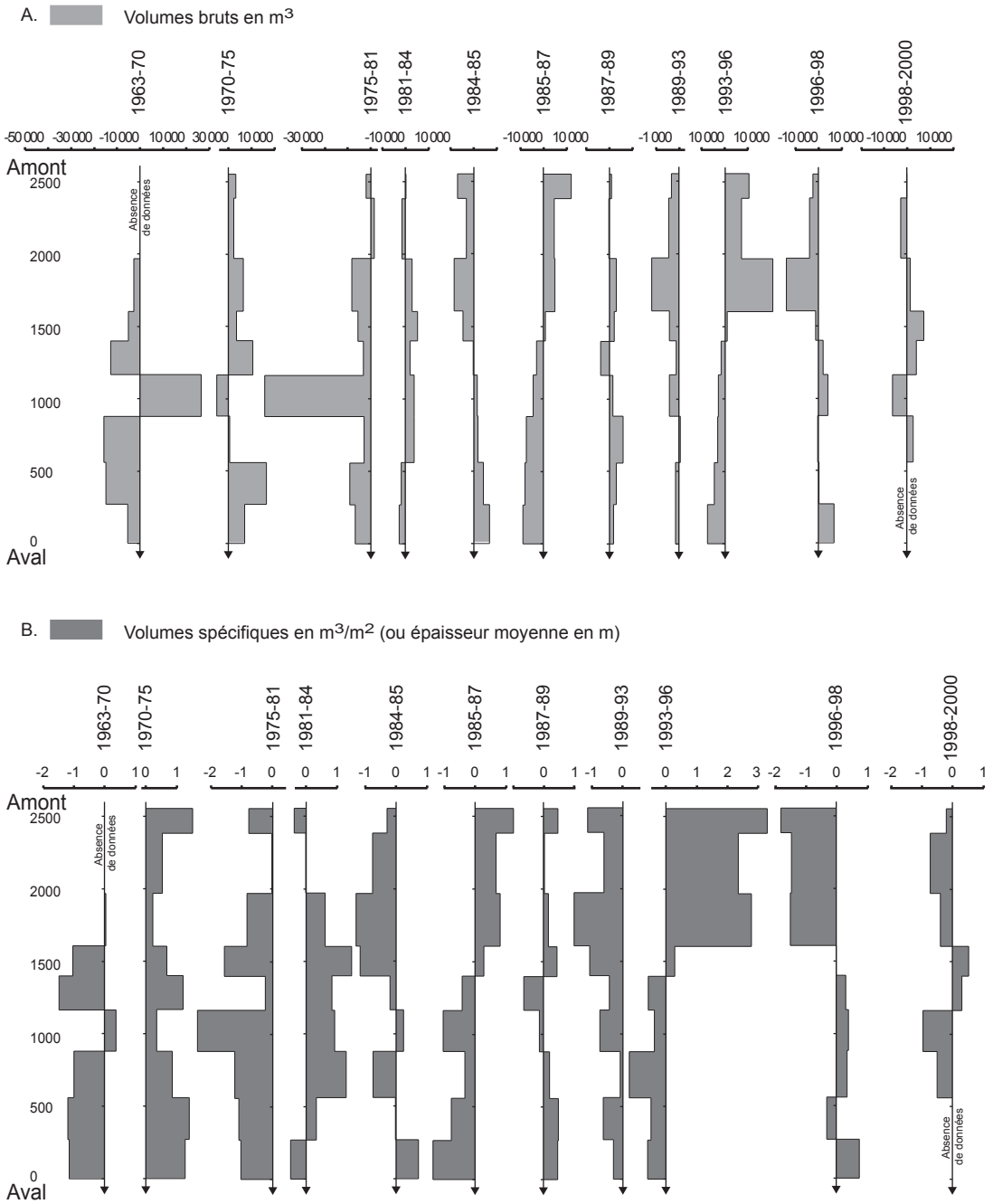


Figure 3-10
Evolution des volumes de sédiments accumulés dans le chenal découpé en 9 zones d'amplitudes homogènes ; A : volumes bruts, B : valeurs spécifiques correspondant à une épaisseur moyenne de matériaux

stockés en amont du chenal, bien que dans la partie aval les volumes mis en œuvre soient plus conséquents. Comme pour les figures précédentes de ce chapitre, nous avons délibérément fait une entorse à la représentation conventionnelle des histogrammes où le volume représenté devrait être fonction de la surface graphique ; ici l'épaisseur de l'histogramme indique directement le volume ce qui permet d'améliorer de manière conséquente la lisibilité et la compréhension des résultats.

Entre l'amont et l'aval, deux comportements différents se dégagent, de part et d'autre d'une limite se situant à la distance d'environ 1 500 mètres par rapport à la plage de dépôt. La partie amont présente de manière continue pendant toute la période d'étude des alternances entre accumulation et purge sédimentaire, avec toutefois un accroissement progressif des épaisseurs de matériaux mobilisés dans

le temps. Dans la partie aval, on observe de fortes alternances d'accumulation et d'ablation jusqu'en 1985, alors qu'ensuite les phases de purges dominent.

Chacune de ces zones a également été représentée par un graphique montrant l'évolution du volume dans le temps en fonction des différentes dates étudiées (**Cf. Fig. 3-11**). Ce volume est présenté avec

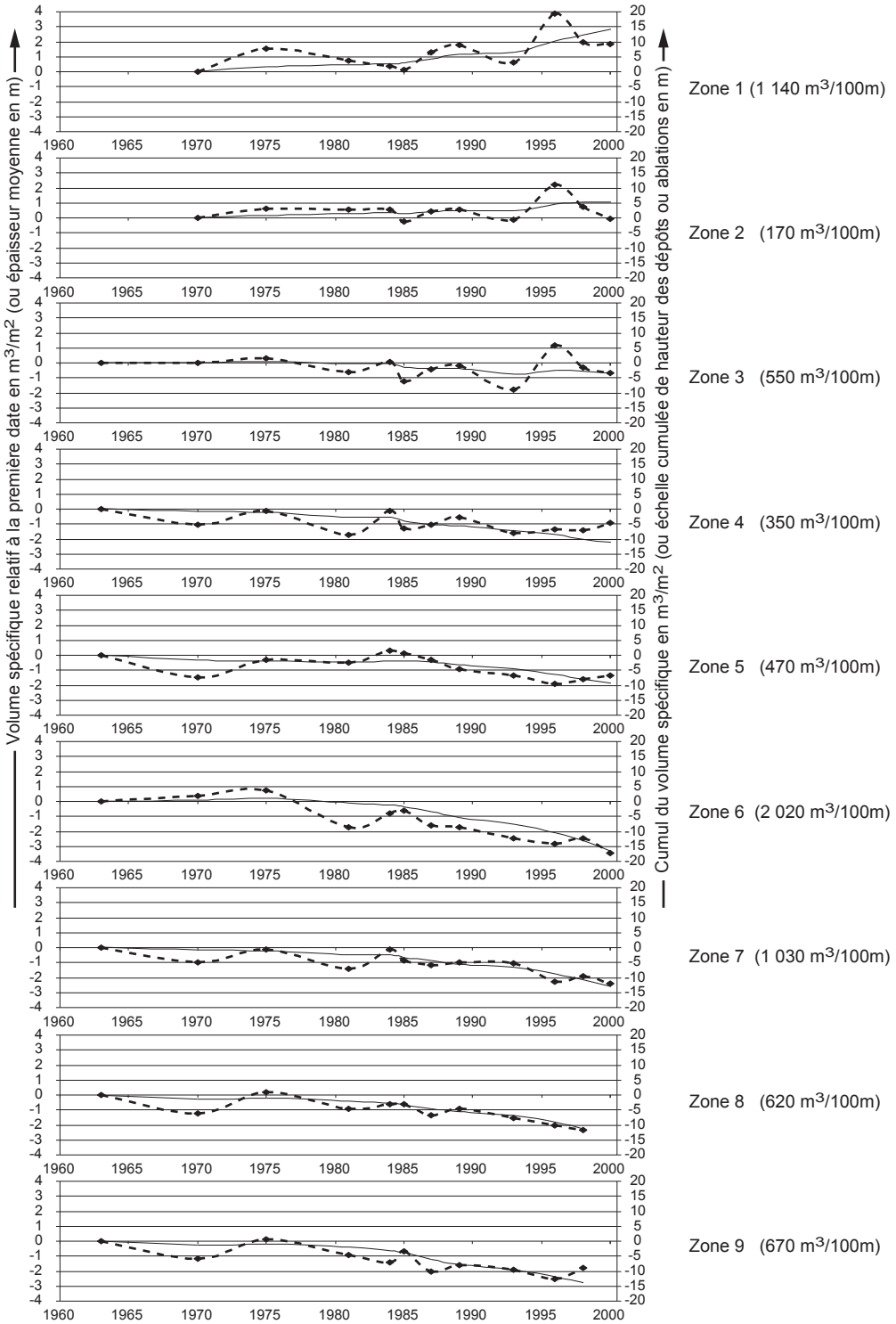


Figure 3-11
Evolution dans le temps des 9 zones du chenal du Manival d'amplitudes homogènes en fonction des volumes spécifiques relatifs (en pointillé) d'après les dates étudiées (losanges) ; en trait plein, les mêmes valeurs cumulées et entre parenthèses, la variation maximale pour 100 m linéaires

des valeurs relatives à la première mesure. Cela a permis de dégager les caractéristiques des zones suivantes :

- La zone 9 correspond quasiment à la plage de dépôt qui, on l'a vu plus haut, a un fonctionnement spécifique : dépôt fréquent de matériaux en particulier lors de laves torrentielles et curages réguliers.
- Les zones 6 et 1 ont des amplitudes spécifiques très importantes de plus de 2 000 m^3 pour 100 m de linéaire pour la première et de plus de 1 100 m^3 pour 100 m de linéaire pour la seconde qui se situe pourtant en tête de bassin versant où le chenal est beaucoup plus étroit et pentu qu'en aval.
- A l'inverse, la zone 2, avec une amplitude d'environ 170 m^3 pour 100 m de linéaire, ne semble pas stocker de fortes quantités de matériaux. Il s'agit d'une zone en gorge affectée essentiellement par des processus de transit.
- En amont, la zone 1 semble stocker de plus en plus de matériaux au cours du temps, alors que la tendance s'inverse nettement à l'aval pour les zones 6, 7, 8 et 9. Quant aux zones intermédiaires, 2, 3, 4 et 5, elles connaissent des variations plus fréquentes de leur état de remplissage.

Le chapitre de synthèse de cette partie, prenant en compte l'ensemble des composantes de la dynamique sédimentaire (apports de versants, fonctionnement des ravins, influence des facteurs hydrométéorologiques), permettra de mieux développer l'analyse de l'évolution sédimentaire du chenal en tentant d'établir des bilans sédimentaires.

2. Fonctionnement et apports sédimentaires dans le bassin de réception

Le chenal constitue la zone-clé dans les processus participant à la dynamique sédimentaire du bassin versant, et nous avons déjà expliqué précédemment le rôle prépondérant des accumulations de matériaux dans le chenal pour le déclenchement et le développement des laves torrentielles. Toutefois, il nous a semblé primordial d'acquérir un minimum d'informations sur les apports sédimentaires de versants. La fourniture de matériaux en amont du chenal détermine en grande partie sa recharge. Pour l'étude de la dynamique sédimentaire du bassin versant torrentiel et l'élaboration de bilans sédimentaires, la localisation des sources sédimentaires est déterminante ; la compréhension du fonctionnement à l'interface entre versant et chenal est le second point-clé. Deux types de travaux ont donc été réalisés :

1) Nous avons développé une cartographie fonctionnelle de production sédimentaire d'intensité relative, permettant de localiser les zones de production sédimentaire ainsi que celles qui fournissent le plus de matériaux au chenal torrentiel. Une clé de détermination originale permet d'établir les dix classes de production représentées.
2) Une zone particulière du torrent a été étudiée à un rythme saisonnier sur une période de trois ans. Il s'agit du ravin principal en tête de bassin versant, zone intermédiaire à l'interface entre versant et chenal. Les ravins sont le prolongement amont du chenal dans la tête de bassin, auxquels on pourrait faire correspondre dans les bassins torrentiels, l'ordre 1 des méthodes classiques d'ordination du réseau hydrographique [Horton, 1945 ; Strahler, 1957 ; Shreve, 1966]. Avec une section érodée en "V" et souvent des points durs naturels en fond de talweg, ils sont similaires aux ravines que l'on trouve sur les versants, avec toutefois une profondeur plus forte. Les données météorologiques recueillies sur le site d'étude ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la dynamique sédimentaire du ravin étudié.

2.1. Cartographie fonctionnelle des apports sédimentaires du bassin versant

2.1.1. Méthode de classification synthétique adaptée à la recharge sédimentaire

L'objectif de la cartographie est de spatialiser les zones de production sédimentaire de l'ensemble du bassin versant afin de connaître les zones de recharge du chenal. Dans cette optique la cartographie s'attache surtout à identifier les zones les plus productrices fournissant des matériaux au chenal, et non pas d'établir quels sont les taux de production. Il ne s'agit pas non plus de dresser une représentation exhaustive de tous les processus géomorphologiques.

Jusqu'à présent, les études qui caractérisent les apports sédimentaires se sont soit focalisées sur un seul processus avec des mesures très précises [Francou, 1988 ; Allée, 1997 ; Rovéra, 1997], soit sont très générales en utilisant une succession d'informations analytiques existantes, souvent à partir de cartes géologique, de végétation, des pentes, géomorphologique,… [White, 1989 ; Van Ghelue et Van

Molle, 1990 ; Dedkov et Moszherin, 1992 ; Rooseboom et Lotriet, 1992 ; Delannoy et Rovera, 1996 ; Latulippe et Peiry, 1996 ; Dalla Fontana et Marchi, 1998 ; Brochot *et al.*, 2002]. Comme nous l'avons déjà expliqué dans les parties précédentes, ces approches ne nous semblent pas adaptées à l'étude de la dynamique sédimentaire à l'échelle du bassin versant torrentiel, c'est pourquoi une cartographie fonctionnelle spécifique a été développée.

Bien entendu, si des cartes détaillées concernant la végétation, la géologie ou la géomorphologie existent, elles peuvent servir de base à cette cartographie spécifique, mais cela n'est pas indispensable. D'autant que ce type de carte effectué à l'échelle du bassin versant est relativement rare ; il est plus généralisé à des échelles régionales.

La détermination des différentes classes dépend de plusieurs variables plus ou moins fortement liées entre elles et que nous avons sélectionnées en fonction de leur importance en terme d'influence sur l'apport sédimentaire. Une combinaison d'informations sur la connectivité au chenal, la couverture végétale, la lithologie, et certains processus géomorphologiques limite le nombre de classe à dix. Pour chacune d'entre elles, la clé de détermination de la **figure 3-12** indique le degré d'intensité relative de la production sédimentaire [Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005].

La première entrée de cette clé de détermination (**Cf. Fig. 3-12**) concerne l'état de connexion des zones de production des versants au chenal. Très logiquement, si ces zones sont déconnectées, les matériaux seront temporairement stockés dans les versants et la recharge du chenal sera quasiment nulle. Bien que ces matériaux puissent être repris à une échelle de temps géologique, pour l'échelle temporelle beaucoup plus courte qui nous intéresse dans l'estimation et la gestion des risques torrentiels, on peut considérer qu'ils ne sont pas disponibles pour le torrent.

Il est bien établi que la végétation joue un rôle important vis-à-vis de l'érosion : bien qu'elle puisse accentuer l'action érosive de certains processus géomorphologiques, lorsqu'une forêt entraîne une surcharge sur un glissement de terrain par exemple, la couverture végétale a généralement tendance à limiter l'érosion [Cosandey, 1995]. Rey et al. [2004] ont fait une synthèse bibliographique sur l'érosion hydrique très riche d'enseignements. Outre les connaissances sur les mécanismes d'action de la végétation vis-à-vis des différents types de processus érosifs et les résultats d'investigations portant sur l'efficacité de différentes formations végétales, ils font un point sur les résultats des recherches concernant l'importance du taux de couverture végétale. Des études menées à l'échelle du bassin versant ont montré qu'en général, l'érosion diminue quand la couverture végétale augmente [Luckman, 1992 ; Olyphant et Harper, 1995 ; Kostadinov *et al.*, 1996 ; Stott, 1997 ; Battany et Grismer, 2000]. Il en va de même sur des surfaces plus réduites [Carroll *et al.*, 2000]. La densité de la couverture végétale permet en général de déterminer s'il y a ruissellement ou pas : jusqu'à 70 % de couverture végétale, l'eau ruisselle en grande partie ; au-delà, l'eau percole et ne ruisselle plus, sauf s'il y a saturation des sols [Rey *et al.*, 2004]. En dessous de 70 %, la répartition de la végétation joue un rôle important

et l'intensité érosive peut-être très variable. Rogers et Schumm [1991] ont observé une production sédimentaire de versants augmentant rapidement lorsque la couverture végétale variait de 43 à 15 %. 15 % apparaissaient alors comme une valeur-seuil minimale pour que la végétation joue un rôle significatif contre l'érosion. A l'échelle de ravines marneuses, Rey [2003] a montré qu'il était possible d'obtenir une production sédimentaire nulle à l'exutoire d'une ravine avec seulement 33 % de couverture végétale. Une valeur de 40 % a été avancée par Mc Ivor et al. [1995] comme couverture végétale minimale à maintenir ou installer sur des terrains érodibles pour une maîtrise significative de l'érosion. Finalement, au vu de la littérature, nous avons défini trois classes limitées par des taux de couverture végétale de 30 et 70 %. La nature des formations végétales n'a pas été prise en compte, sachant que même une prairie herbeuse peut avoir des effets non négligeables pour limiter l'érosion, en particulier lorsque celle-ci est associée à du ruissellement diffus [Derouiche A., 1997 ; Hill et Peart, 1998 ; White et Loftin, 2000].

La géologie a permis de discriminer les classes ayant un plus faible taux de couverture végétale. Marie [1992] avait proposé une classification basée sur la lithologie et la structure géologique pour déterminer l'occurrence possible de laves torrentielles (Cf. le classement lithologique de Marie en annexe) ; nous nous en sommes inspirés dans cette étude. Ce type de classification pourra aussi être retrouvé dans certains modèles statistiques d'estimation des volumes de lave torrentielle [D'Agostino *et al.*, 1996 ; Brochot, 1998]. Nous avons retenu trois classes géologiques : les formations rocheuses cohésives et résistantes, les formations de roches altérées ou les formations superficielles, les formations rocheuses fracturées et plissées. Telle que nous avons pu l'observer sur le Manival, cette dernière classe regroupe les zones les plus productrices composées de dérochoirs.

Enfin, suite à nos observations de terrain, quatre processus géomorphologiques nous ont semblé avoir une importance prédominante sur l'activité érosive permettant la recharge sédimentaire du chenal torrentiel : les chutes de pierres et de blocs provenant de dérochoirs ou d'escarpements rocheux sub-verticaux, l'éboulisation généralement matérialisée par des tabliers d'éboulis, le ravinement marqué par un réseau de ravins et ravines, les sapements de pied de versant qui forment de larges cicatrices d'érosion à proximité des talwegs. Nous avons également indiqué si le contrôle des processus provenait principalement de l'amont ou de l'aval. Comme l'a montré Peiry [1990] dans une typologie fonctionnelle des torrents de l'Arve, ce contrôle a une importance dans l'origine des apports sédimentaires et la fréquence des transports solides. Les processus dominés par un contrôle amont sont indépendants de l'évolution du chenal, comme les chutes de pierres ou de blocs, alors que le contrôle aval, comme les sapements de pied de versants deviennent plus productifs lors de l'enfoncement du talweg. Dans le torrent du Manival, les ouvrages de correction torrentielle stabilisant le profil en long du chenal rendent les processus du second groupe (contrôle aval) moins actifs.

Il est important de signaler qu'au-delà de ces dix classes, des mouvements de masse de forts volumes peuvent survenir et être appréhendés dans des scénarios extrêmes. Ces "aléas potentiels"

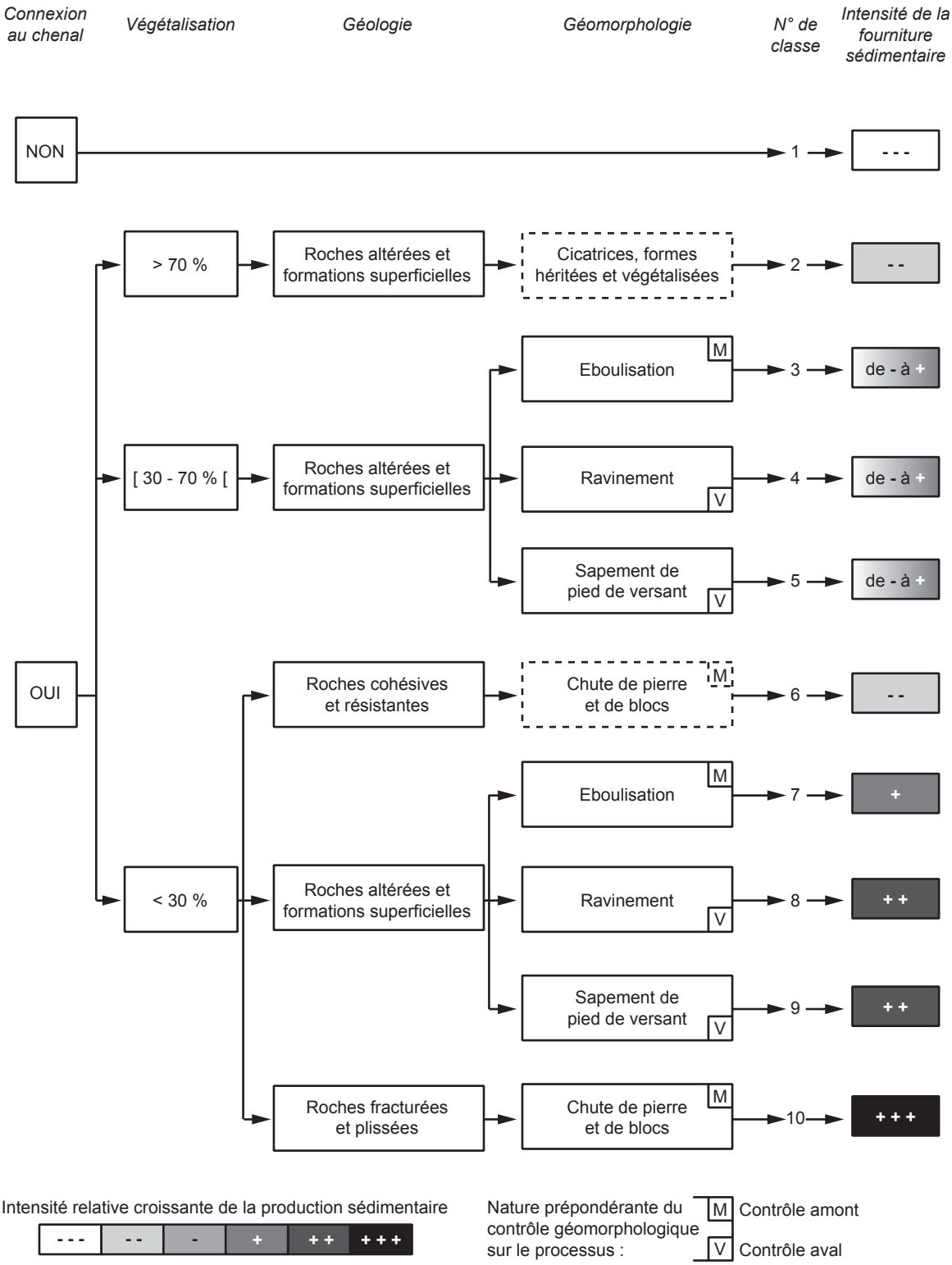


Figure 3-12
Clé de détermination de classes pour une cartographie fonctionnelle des zones de production sédimentaire d'un bassin versant torrentiel (en pointillés, processus géomorphologiques peu visibles) (d'après Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005)

supplémentaires sont au nombre de trois : les écroulements, les mouvements de masse rapides lors de sapements de pied de versant, les grands glissements de terrain.

Par exemple, l'observation des photographies aériennes montre qu'un écroulement a eu lieu entre 1970 et 1975 en rive gauche. Les matériaux se sont déposés dans le chenal, ensevelissant deux barrages. La taille de certains blocs a légèrement modifié le cours du chenal qui contourne désormais ce dépôt par la droite. Il s'en est suivi une érosion plus importante de la rive droite (classe n°9), et la nécessité de déplacer et/ou surélever les cuvettes des barrages RTM n°22 et n°23.

Nous avons vérifié que les glissements de terrains n'étaient pas présents dans le bassin versant du Manival en observant attentivement les seules zones connectées au chenal susceptibles d'en receler. Il s'agit des deux tabliers d'éboulis situés en rive gauche au niveau de la gorge du Manival, dans lesquels nous avons planté des fers à béton peints en rouge le long de transects parallèles au chenal. Ces piquets de 1,5 mètre de haut ont été enfoncés au marteau de 0,5 mètre pour certains et 1 mètre pour les autres. Depuis 1999 les seuls mouvements de piquets sont survenus pour ceux enfoncés le moins profondément dans l'éboulis aval, suite à de petites coulées de neige lourde printanière, ce qui infirme les hypothèses de glissements de terrain sur le bassin étudié.

Outre ces trois aléas supplémentaires, il est également possible de prendre en compte la rupture éventuelle d'une série de barrages de correction torrentielle dans l'élaboration de scénarios extrêmes.

Une carte du bassin versant a ainsi pu être créée de manière relativement simple et rapide à partir d'observations de terrain et de mesures sur photographies aériennes, afin d'appréhender les principales zones de productions sédimentaires du bassin. Des exemples photographiés sur le terrain illustrent la plupart de ces classes (**Cf. Fig. 3-13**) Les documents bibliographiques existants peuvent éventuellement constituer une source supplémentaire d'information.

2.1.2. Représentation cartographique anamorphosée

La représentation cartographique des dix classes de production sédimentaire relative dans le bassin versant du Manival a été présentée sous la forme d'une anamorphose, c'est-à-dire que ce sont les surfaces réelles, tenant compte de la pente, qui ont été représentées et non des surfaces projetées sur un plan horizontal. En effet les cartographies classiques sous-estiment les zones à fortes pentes, or ces dernières coïncident souvent avec les zones sources de sédiments. L'intérêt d'une telle représentation a été la prise en compte des pentes dans la visualisation des surfaces productrices.

La cartographie anamorphosée est le résultat d'une déformation de la carte conventionnelle qualifiée par Langlois et Denain de "métaphore spatiale" [Langlois et Denain, 1997] qui, dans notre cas, projette les surfaces sur un plan horizontal ; par un calcul prenant en compte les altitudes (ou la pente), les

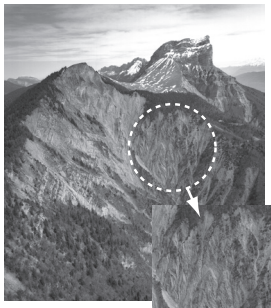
Classe 1 : Zones déconnectées du chenal

Classe 2 : Zones fortement végétalisées

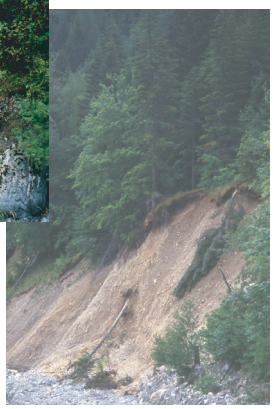
Classe 3 : Zones d'éboulis partiellement végétalisées

Classe 5 : Zones de sapement de pied de versant (végétalisées)

Classe 7 : Zones d'éboulis faiblement végétalisées



Classe 8 : Zones de ravines faiblement végétalisées



Classe 9 : Zones de sapement de pied de versant

Classe 10 : Zones de roches fracturées et plissées

Figure 3-13
Quelques exemples des classes de la cartographie fonctionnelle des zones de production sédimentaire d'un bassin versant torrentiel (Cf. Fig. 3-12) (Clichés S.V-C.)

coordonnées des points projetés ont été modifiées. Il existe une littérature spécialisée sur ce sujet [Cauvin, 1996] ainsi que des exemples dans de nombreux domaines [Tobler, 1986 ; Dumolard *et al.*, 2003]. On peut distinguer deux catégories de transformation [Langlois et Denain, 1998] : l'anamorphose vectorielle, qui consiste à déformer la carte à partir de vecteurs associés à des pôles et l'anamorphose scalaire où la déformation est réalisée à partir d'une valeur numérique (un facteur scalaire) associée à chaque pôle, qui dilate ou rétrécit l'espace en modifiant l'échelle locale autour du pôle en fonction de la valeur associée. Cette seconde catégorie nous a semblé plus complexe à mettre en œuvre, bien que certains logiciels permettent de réaliser ce genre de transformation comme *Anaplaste* par exemple [Cauvin, 1998]. On peut imaginer de dresser une carte des pentes (à l'aide d'un logiciel de SIG) puis de calculer les surfaces par rapport au sinus de la pente ; mais cela nécessite de détenir un MNT de la zone étudiée et d'utiliser un logiciel spécifique de cartographie. Nous avons donc utilisé une anamorphose vectorielle, mieux adaptée aux mesures topographiques ponctuelles, dont la **figure 3-14** présente la méthode ayant permis cette déformation. Les étapes principales de calcul sont les suivantes :

Dans un premier temps, le chenal a été représenté par une simple droite. La forme allongée des chenaux torrentiels est propice à cette simplification. Ainsi, sur le plan horizontal, quelques points bien répartis sur le linéaire du chenal ont été projetés sur une droite de tendance, elle-même calculée selon la méthode des moindres carrés. Les coordonnées altitudinales, z, de ces points ont été conservées. Le chenal est ainsi représenté par tous les points de la droite ayant des coordonnées x, y, et z, dans les trois dimensions.

Dans un second temps, les coordonnées x, y, de l'ensemble des limites topographiques et des zones productrices du bassin versant ont été modifiées. La nouvelle localisation des points pour la représentation anamorphosée a été déterminée selon une distance à partir du chenal et une direction. A partir de la droite représentant le chenal, le nouveau point se situe à une distance identique à la distance de surface réelle, qui est comprise entre le point topographique mesuré et le chenal, en fonction de leurs altitudes respectives. La direction est perpendiculaire à la droite représentant le chenal sauf pour la partie située en amont du talweg où elle est différente : elle est déterminée par la droite comprenant à la fois le point de mesure et le dernier point à l'extrémité amont du chenal. (**Cf. Fig. 3-14**).

Les coordonnées des points pour la représentation anamorphosée ont ensuite été calculées suivant les règles trigonométriques classiques disposant d'une part de la distance au chenal et d'autre part de la direction à partir du chenal passant par le point topographique. Les calculs ont été effectués à l'aide d'une macro-commande développée en *VisualBasic* sur le logiciel *Excel*, où il faut indiquer le tronçon référence de la droite du chenal pour chaque point de mesure (Cf. détail des macro-commandes en annexe).

Ainsi en suivant cette technique cartographique, les zones de production sédimentaire du bassin versant ont été représentées sur la **figure 3-15**. Les zones où la production sédimentaire est la plus intense

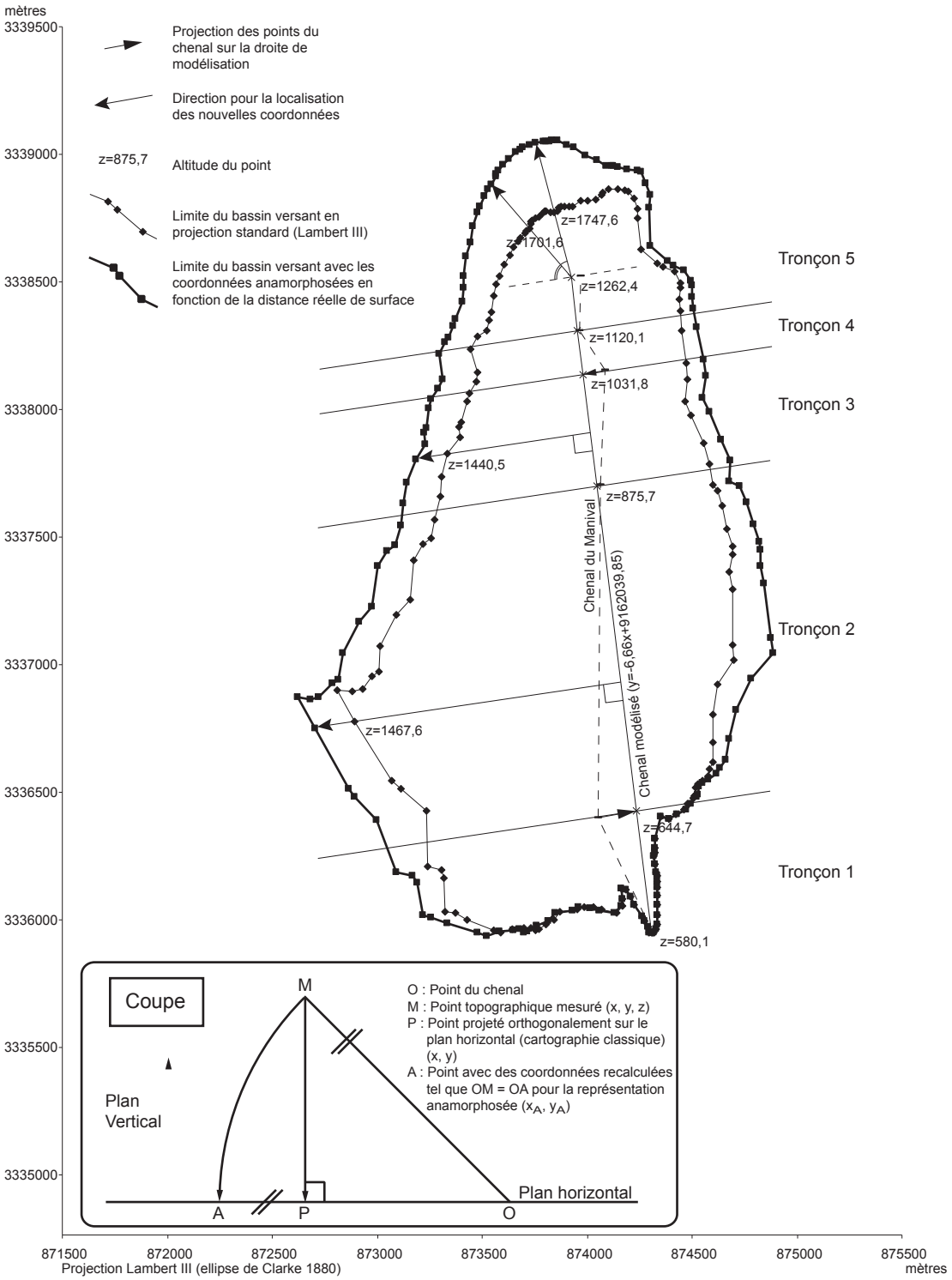
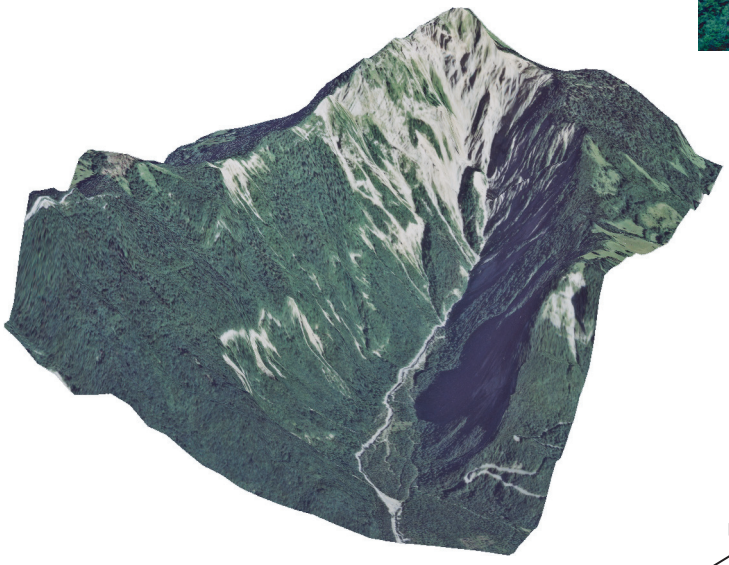


Figure 3-14
Méthode de calcul de la cartographie anamorphosée. Les nouvelles coordonnées sont déterminées en fonction d'une direction et de la distance réelle de surface, par rapport au chenal

se situent en amont du bassin de réception principalement au niveau du dérochoir de l'escarpement sommital, composé de couches alternées à composantes calcaires et marneuses dont l'ensemble est fortement plissé et fracturé. L'intérêt de la carte anamorphosée est bien visible car la zone principale d'apport de matériaux, composée d'escarpements rocheux subverticaux, couvre alors une plus grande

Zone sommitale,
la plus productive.



A. 3-D vue of the Manival watershed (orthophotography drapped on V-DEM with ErMapper software).

B. Functional map
realised on Manival basin.

Figure 3-15
*Représentation anamorphosée des zones de production du bassin versant du Manival et de leurs contributions relatives dans la recharge sédimentaire du chenal (B) (**Cf. Fig. 3-12 qui sert de légende**). La zone de production principale située sous le Bec Charvet, en forte pente (A), est ainsi mieux représentée que sur une carte classique (projection sur un plan horizontale) (Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005) (Clichés S.V-C.)*

surface, ce qui représente bien mieux la réalité. A titre d'exemple, la surface drainée en amont du point le plus haut du chenal (ravin principal) représente 75 000 m^2 sur une cartographie classique (projection horizontale), alors qu'elle est de 130 000 m^2 dans la réalité et sur la représentation anamorphosée.

2.2. Etude du ravin supérieur du Manival : rythmes saisonniers de la recharge sédimentaire

Comme nous l'avons déjà vu plus haut, les ravins sont des entités géomorphologiques particulières jouant un rôle important dans les apports sédimentaires au chenal. Localisée entre versant et chenal, une partie d'un ravin actif a été suivie en étudiant les variations de la topographie de surface, leurs liens avec les conditions hydrométéorologiques, et le mouvement des plus gros blocs.

2.2.1. Localisation du site en tête de bassin

Nous avons choisi un site d'observation et de mesure qui a permis sur une période de trois années un suivi précis et régulier, c'est-à-dire au rythme des événements pluviométriques. Le processus de ravinement est particulièrement important dans le transport sédimentaire du bassin versant puisqu'il permet le transfert d'une part conséquente de matériaux des versants au chenal. Bien que les échelles de temps et d'espace associées aux ravins soient plus courtes que celles des bassins versants, le schéma conceptuel proposé par Schumm [1973] (**Cf. Fig. 1-16**) permet également d'expliquer les instabilités et le fonctionnement de la dynamique sédimentaire du ravin. Les ravins sont des unités intermédiaires ayant une capacité plus importante que les ravines qu'ils drainent généralement. Ils peuvent être considérés comme le niveau élémentaire du réseau hydrographique torrentiel. A partir des premières observations de terrain, nous avons choisi un ravin en fonction de la forte dynamique apparente des processus de recharge sédimentaire. Dans celui-ci, nous avons étudié la zone à l'extrémité amont pour se placer à l'interface entre le versant et le talweg.

Le site de mesure est localisé dans le talweg du ravin du Manival, couramment nommé branche principale, dans sa partie la plus haute à environ 1 250 mètres d'altitude, au pied même de l'escarpement rocheux formé par le Bec Charvet (**Cf. Fig. 3-16**). Avec une pente d'environ 32° soit 62,5%, il se situe

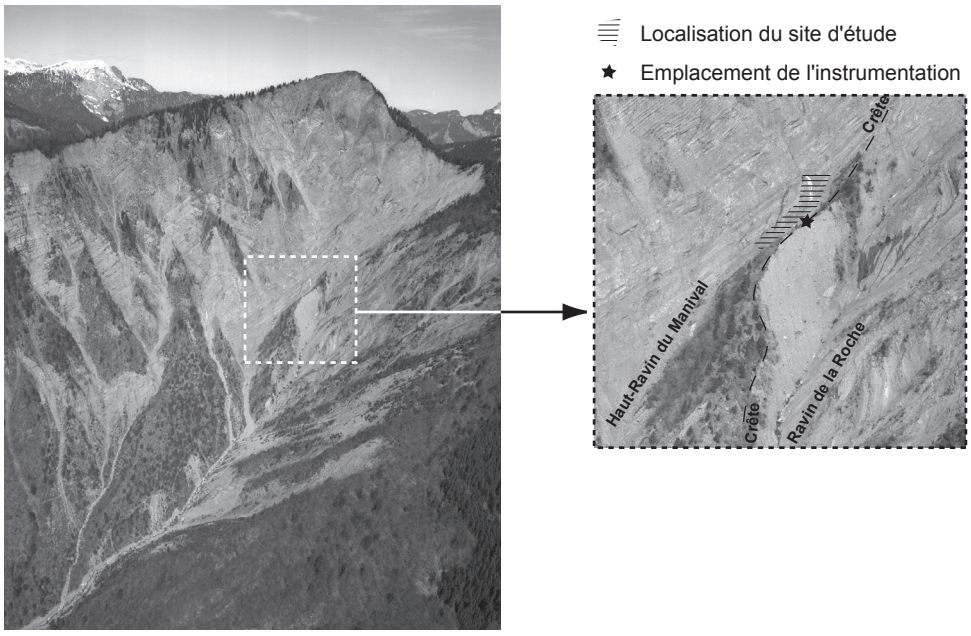


Figure 3-16
Localisation du site d'étude du Haut-Ravin du Manival et de l'instrumentation sur une crête au coeur du bassin de réception (Cliché M.Mémier - Sintégra)

en tête de bassin. A cet endroit, les eaux sont collectées sur une surface projetée sur un plan horizontal d'environ 75 000 m², ce qui représente, avec des pentes allant de 45 à 55°, une surface réelle d'environ 130 000 m². La zone de mesure a une superficie inférieure à 1000 m².

Le suivi de ce site s'est déroulé avec de fortes contraintes liées à la dangerosité et au relief escarpé. Au pied du dérochoir, les chutes de pierres étant quasi permanentes, les accès directs ont été limités au strict minimum, et quand cela a été nécessaire un maximum de précautions a été pris (casque, guetteur,…). Quant au lieu d'observation, bien que plus sûr, il n'était pas très confortable puisque situé sur une arête effilée entre deux ravins (**Cf. Fig. 3-16**). Une sente sur des versants relativement pentus a permis un accès au site assez rapide d'environ une heure de marche. L'inquiétude et la mobilité malaisée de nombreux visiteurs qui ont eu la gentillesse et la curiosité de nous accompagner attestent de ces conditions de terrain particulières.

2.2.2. Mesures des variations sédimentaires du ravin

Du fait d'une inclinaison plus marquée que la pente moyenne du chenal, le choix des outils et de la méthode de mesure s'est imposé encore plus clairement que lors du suivi topographique entrepris dans le chenal du torrent. L'ensemble des méthodes permettant de mesurer et comprendre la dynamique sédimentaire [Peart, 1989], tels que les chaînes d'érosion [Liébaut, 2003], les marquages de matériaux [Butler, 1977 ; Schmidt et Ergenzinger, 1992], ou le piégeage de sédiments [Roose et Bertrand, 1971 ; Richard et Mathys, 1997 ; Rovéra *et al.*, 1999 ; Diallo *et al.*, 2000], déjà présentées dans la seconde partie de cette thèse, a également été écarté. Finalement, la mesure topographique de surface est restée l'outil privilégié pour suivre l'évolution de ce site dans le but de comparer les états de surface mesurés à différentes dates, sachant que dans ces conditions difficiles, aucune prospection géophysique n'a pu être menée afin d'estimer l'épaisseur totale de matériaux mobilisables.

Les appareils topographiques utilisés précédemment, télémètre laser et boussole électronique, se sont avérés être très bien adaptés à ce type de terrain difficile, puisqu'ils sont relativement légers et maniables, et qu'aucune mire réflectrice n'est nécessaire. Ainsi les mesures ont été prises à partir du point d'observation, hors de portée des chutes de pierres. L'appareillage de mesure a été placé sur un trépied, lui-même calé par des fers à béton fixés dans le sol (**Cf. Fig. 3-17**).

La préparation du site a consisté en un marquage à la peinture nécessitant un accès à la zone dangereuse. Il s'agissait dans un premier temps d'avoir des points fixes de référence pour la topométrie. Dans ce milieu naturel instable, nous avons fait de larges croix rouges sur la roche de l'escarpement du Bec Charvet. Ces croix encadraient assez bien la zone de mesure (**Cf. Fig. 3-17**). Bien qu'elles aient été faites sur la roche en place, l'érosion de surface des zones marneuses et les intempéries les ont fait totalement disparaître en seulement deux ans, et malgré le repérage de quelques points n'ayant pas bougé au centre de la zone, les données mesurées la troisième année n'ont pas pu être exploitées. En

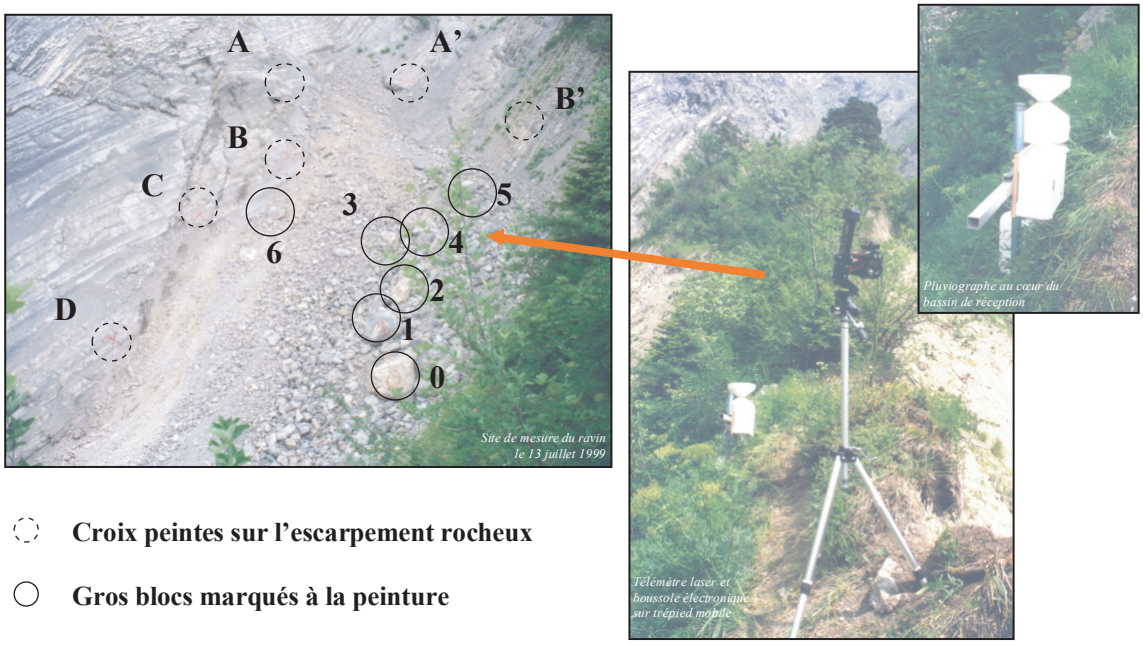


Figure 3-17
Site de mesure du Haut-Ravin du Manival et appareillage (télémètre laser et boussole électronique, pluviographe) placé sur la crête distante d'environ 50 m. Le 13 juillet 1999, les matériaux accumulés dans le talweg recouvraient un névé conséquent qui a fondu complètement à la fin du mois d'août (Clichés S.V-C.)

effet, l'absence des points de repère initiaux a entraîné un décalage des mesures à la périphérie du site engendrant par la suite des erreurs de calculs, par effet d'extrapolation, trop importantes pour être utilisées. Malheureusement, ces marques n'ont pu être repeintes car l'enfoncement du sol par érosion des matériaux les avaient placées à plusieurs mètres de hauteur, rendant la manœuvre trop périlleuse. Lors de la séance de marquage initial, quelques blocs de taille plus importante, de 1 à 6 m^3 ont été repérés à la peinture dans le but de mesurer et/ou d'observer leurs déplacements éventuels durant la période de mesure.

La méthode a consisté à mesurer des points répartis sur des pseudo-transects fictifs qui suivent cinq inclinaisons en fonction des repères peints sur le rocher (croix). Les appareils mesurant la distance, l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale, et l'azimut, les coordonnées de chaque point ont été calculées par trigonométrie dans un repère relatif local (x, y, z). L'origine du repère a été placée sur la première croix, en haut à gauche (rive droite du talweg). Puis avec le logiciel *Surfer*, une interpolation par la méthode de krigeage, très souvent utilisée pour représenter la surface topographique du terrain, nous a permis de constituer un modèle numérique de terrain (MNT) régulier de la zone avec une maille de 20 centimètres. En comparant les MNT ainsi constitués à différentes dates, nous avons obtenu les variations du stock sédimentaire de la zone étudiée représentées sous forme de carte. Comme le montre la **figure 3-18**, le logiciel permet d'obtenir facilement une vue 3D, une carte des pentes ou encore des profils en travers.

Il est important de signaler que pour chaque série de mesure une photographie du site a été systématiquement prise, ce qui a permis de se remémorer les observations faites et surtout de valider d'une manière fiable les représentations numériques (MNT).

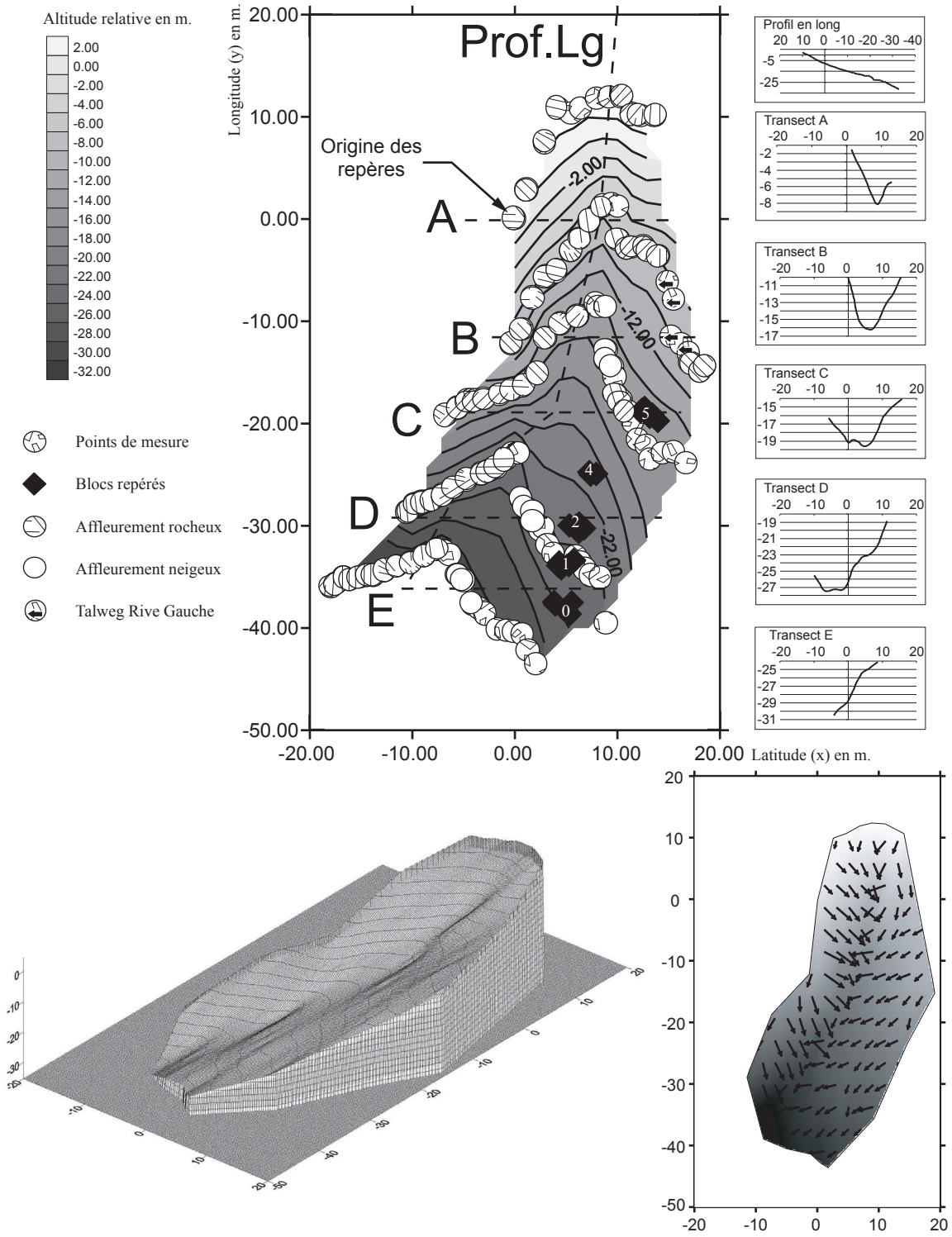


Figure 3-18
Traitement des mesures du 18 août 1999 à l'aide du logiciel Surfer dans le ravin du Manival. Le Modèle Numérique de Terrain permet d'effectuer une carte topographique (en haut), des transects (à droite), une représentation 3D (en bas à gauche), ou encore une carte des pentes (en bas à droite)

La précision des mesures est fortement liée au point origine de référence, dans notre cas une croix peinte sur l'escarpement rocheux, car les erreurs que nous avons faites sur ce point se sont répercutées sur l'ensemble du MNT. Ce type d'erreur peut provenir d'imprécisions de visée dues à l'utilisateur ou à l'appareil qui peuvent être de l'ordre de 10 à 40 cm à cette distance [Le Méhauté, 2000]. Une fois repérée, cette erreur a pu être corrigée par calcul afin de comparer les MNT de différentes dates.

Les croix tracées à la peinture sur l'escarpement rocheux de part et d'autre du chenal, ont permis d'effectuer un calage systématique et identique des mesures pour chaque série de données. Ce système a évité les erreurs liées au traitement des données en particulier lors des interpolations mathématiques [Le Méhauté, 2000].

Le degré de précision concernant le calcul d'interpolation des MNT est de l'ordre de quelques centimètres. Les mesures directes ont quant à elles une marge d'erreur en écart-type de l'ordre de trente centimètres en planimétrie (plan x, y) et de l'ordre de cinq centimètres en altimétrie (axe z) [Le Méhauté, 2000] soit un écart de volume inférieur à 50 m^3 pour la zone d'étude.

La première série de mesures effectuée le 13 juillet 1999 constitue une image de référence qui a servi de point de comparaison pour toutes les autres situations topographiques. Bien entendu la topographie du bedrock, si nous l'avions connue, aurait été une référence plus significative.

2.2.3. Influence des précipitations intenses sur les purges sédimentaires du ravin

Dans le type de torrent que nous étudions, la recharge sédimentaire qui constitue un seuil intrinsèque vis-à-vis de l'instabilité du système torrentiel (**Cf. Fig. 1-17**), est l'élément prédominant dans la dynamique du transport sédimentaire. Cependant, les précipitations participent généralement aux événements de transport solide. Plus largement, les conditions hydrométéorologiques se présentent sous différentes formes : précipitations orageuses de forte intensité, les fortes précipitations sur une longue durée, ou les précipitations neigeuses. Lorsque les intensités pluviométriques sont fortes, elles ont une action temporaire augmentant l'instabilité du système torrentiel, alors que les apports d'eau conséquents sur une plus longue durée ont un rôle indirect sur les processus géomorphologiques qui participent à la recharge sédimentaire du chenal. La plupart des laves torrentielles sur les torrents que nous avons étudiés, où la fourniture sédimentaire est composée de matériaux grossiers, ont pu être associées à des orages intenses de pluie ou de grêle.

Le problème majeur dans l'étude du rôle des facteurs hydrométéorologiques, en particulier dans les zones escarpées de montagne, est le manque de mesures sur le lieu même où l'événement se produit. Les stations météorologiques ont un maillage minimum distant de 10 à 20 kilomètres et les mesures sont faites à des altitudes et des expositions variables. C'est pourquoi nous avons placé un pluviographe dans le bassin du Manival qui donne un ordre de grandeur des précipitations reflétant les conditions

locales même si cette installation ponctuelle n'offre pas une très grande précision quant à leur variabilité spatiale.

A. Données pluviométriques relevées sur le bassin versant

Un pluviographe à augets basculeurs a été placé au cœur du bassin de réception, près du site d'observation, durant les saisons correspondant au déclenchement le plus probable des laves torrentielles, d'avril à octobre. Le matériel de mesure a été retiré du site pendant l'hiver, la neige et le gel pouvant bloquer l'appareil ; de plus celui-ci risquait d'être endommagé par les avalanches. Pour prévenir les risques de perte de données par la détérioration du pluviographe, par la foudre par exemple, celui-ci a été doublé d'un pluviomètre totaliseur.

Sur les deux saisons de mesure, la **figure 3-19** montre un large panel de conditions pluviométriques. Les précipitations tombées durant la saison 1999 ont été assez modérées et, avec des valeurs mensuelles cumulées avoisinant les 100 mm, proches de la moyenne mensuelle du site. Par contre, la saison étudiée en 2000 fut plus contrastée avec un mois de juin très sec –environ 25 mm– et d'autres périodes très arrosées : le mois de juillet fut riche en orages –environ 200 mm– et l'automne très pluvieux – presque 240 mm pour le mois d'octobre. Sur la **figure 3-19**, le pas de temps de mesure fin représente les précipitations totales journalières. Les pics de précipitations de ce graphique coïncident avec ceux d'autres graphiques, non présentés ici, représentant le traitement des données pluviométriques cumulées à des pas de temps différents allant d'une à vingt-quatre heures.

B. Variabilité spatiale des précipitations orageuses

Les caractéristiques principales des précipitations orageuses sont d'une part, leur forte intensité et leur durée assez courte et d'autre part, leur grande variabilité spatiale avec des abats d'eau qui peuvent être très ponctuels [Hürlimann *et al.*, 2003].

Sur le bassin du Manival, le petit événement du 13 mai 2000 est un exemple qui illustre parfaitement le caractère ponctuel des précipitations orageuses. De fortes quantités d'eau sont tombées sur Château Nardent, sur la crête du bassin en rive gauche, déclenchant une petite lave torrentielle (*debris-flow*) sur le versant, qui s'est alors déposée sur le chemin forestier. Dans le même temps, les précipitations au cœur du bassin de réception ont été faibles et les mouvements de matériaux insignifiants. A un kilomètre près, les précipitations ont été très différentes, or les précipitations intenses ont un pouvoir de déstabilisation du système entraînant des mouvements de matériaux, même si cette action est réduite dans le temps.

La station météorologique du Versoud, près de Grenoble, est la station la plus proche du Manival (environ 10 km) proposant des données pluviométriques au pas de temps fin d'1 heure (**Cf. Fig. 3-20**). On constate (**Cf. Fig. 3-21**) que la corrélation à ce pas de temps n'est pas significative ($R^2 = 0,196$). Bien

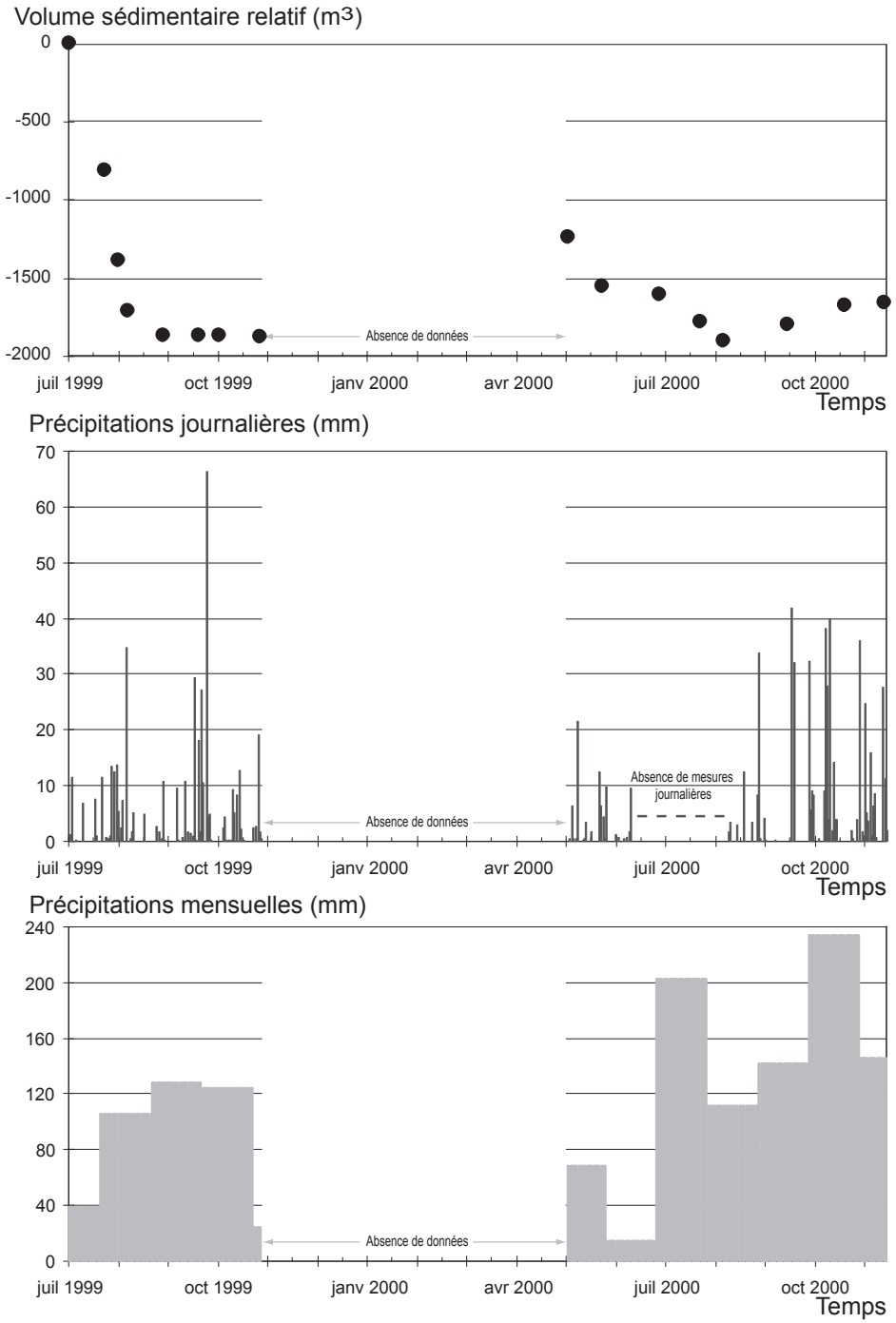
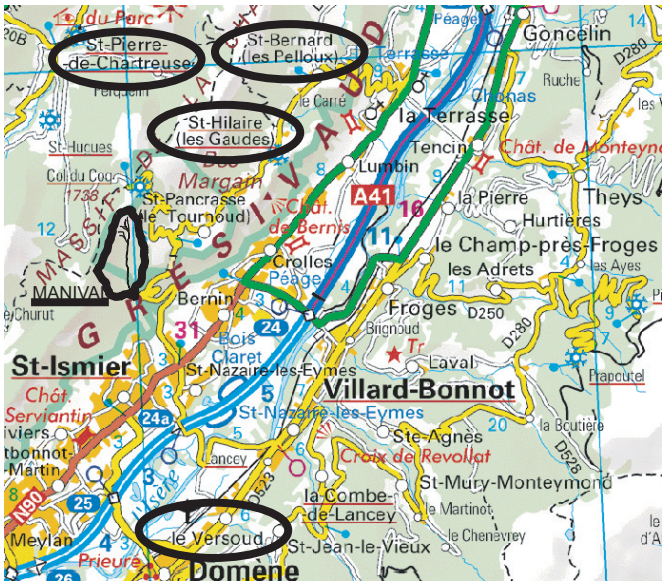


Figure 3-19
Graphique synthétique de l'étude du ravin du Manival montrant l'évolution du volume sédimentaire de la zone (env. 1000 m²) et les précipitations journalières et mensuelles pour les campagnes de mesures de 1999 et 2000 (la période hivernale n'a pas été prise en compte)

qu'il puisse y avoir de nombreuses explications, l'éloignement et l'altitude beaucoup plus basse (220 m.) peuvent en être la raison en entraînant un décalage dans le temps des précipitations d'une station à l'autre. Les corrélations pour des pas de temps de un jour, dix jours, vingt jours et un mois sont bien meilleures ($R^2 > 0,6$ et $p < 0,001$) (**Cf. Fig. 3-22**) ; elles sont inférieures aux valeurs de pluies relevées au Manival. Pour les autres stations proches du bassin versant, St-Pierre-de-Chartreuse, St-Bernard-du-Touvet et St-Hilaire-du-Touvet (**Cf. Fig. 3-20**), nous ne disposons des données pluviométriques qu'au pas de temps mensuel, pour lesquelles les corrélations sont encore meilleures ($R^2 > 0,86$ et $p < 0,001$)


St-Pierre-de-Chartreuse
St-Bernard (les Pelloux)
St-Hilaire (les Gaudes)
Goncelin
la Terrasse
Tencin
Lumbin
la Pierre
Theys
Hurtières
le Champ-près-Froges
les Adrets
Froges
Laval
Villard-Bonnot
St-Ismier
St-Nazaire-les-Eymes
Ste-Agnès
St-Mury-Monteymond
la Combe-de-Lancey
le Versoud
St-Jean-le-Vieux
Domène
Bernin
Crolles
Col du Coq
St-Pancrasse
MANIVAL
Meylan
Prieuré
Croix de Revollat
Chât. de Bernin
Chât. Serviantin
Col du Cucheron
Col de Marcieu
Col de Vence
Col de Porte
Col de Palaquit
Col de Clémencière
Col de Bovinant
Col de Bovinant
Col de Bovinant

(**Cf. Fig. 3-22** et **3-23**). Les données de St-Pierre-de-Chartreuse, village situé à l'intérieur du massif de la Chartreuse, sont systématiquement plus fortes que les valeurs relevées au Manival, alors que celles de St-Bernard-du-Touvet et de St-Hilaire-du-Touvet sont très comparables. Ces deux dernières stations, proches l'une de l'autre, sont situées sur le plateau des Petites Roches à des altitudes comprises entre 900 et 1 000 mètres (**Cf. Fig. 3-20**).

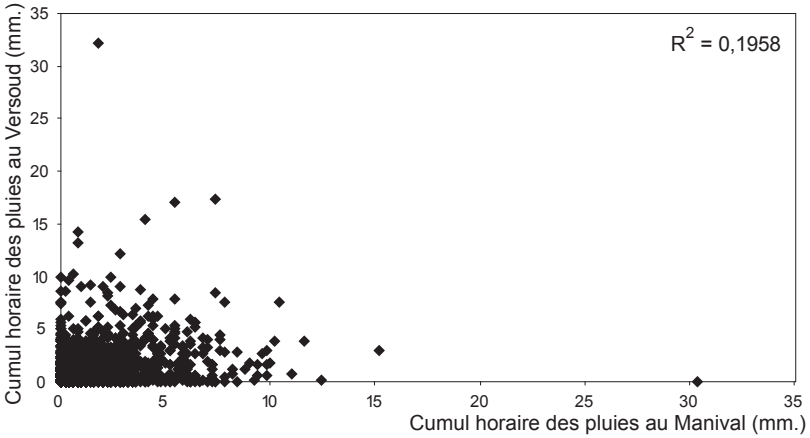


Figure 3-21
Corrélation non significative entre les précipitations horaires relevées au Manival durant la période de mesure (entre 1999 et 2002) et les heures correspondantes à la station du Versoud

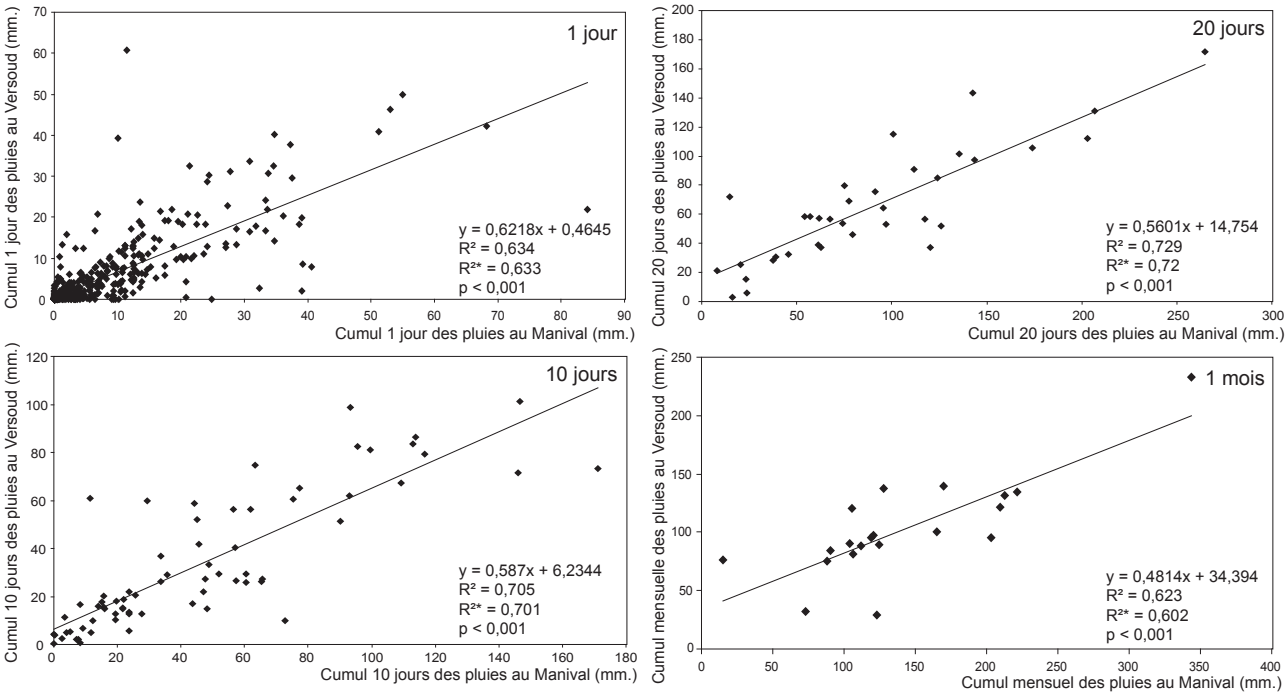


Figure 3-22
Régressions entre les précipitations relevées au Manival et à la station du Versoud à différents pas de temps (1 jour, 10 jours, 20 jours, 1 mois), pour la période étudiée (entre 1999 et 2002)

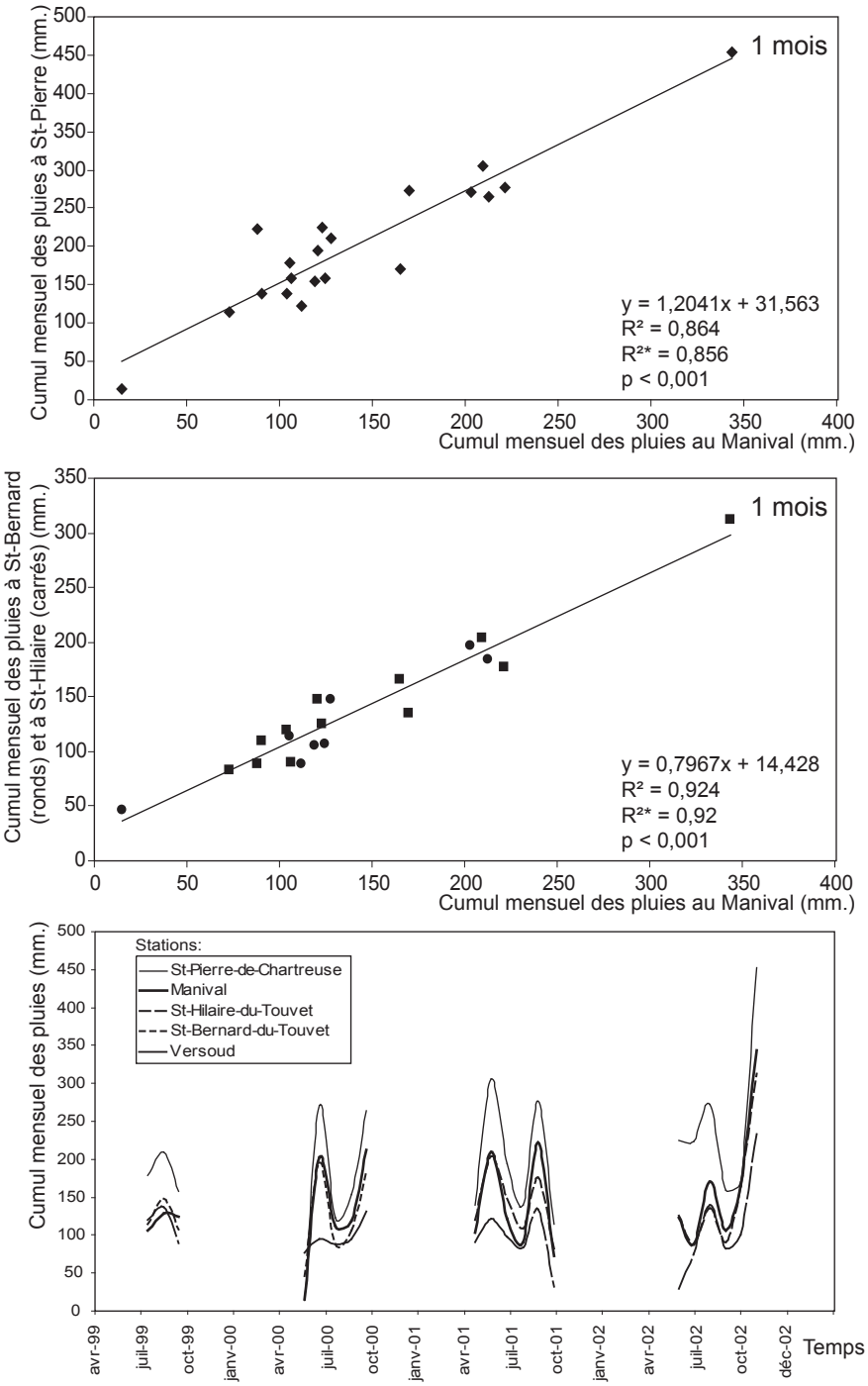


Figure 3-23
Relations statistiques entre les données relevées au Manival et les stations pluviométriques avoisinantes (pas de temps mensuel)

Les orages, souvent associés aux déclenchements de transport solide, sont caractérisés par des intensités élevées sur un laps de temps court. Seules les données des stations du Versoud et du Manival, au pas de temps d'une heure, peuvent être étudiées directement. Les valeurs de précipitations au Manival ont été relevées en temps réel, mais malheureusement il manque une longue période au cours de l'été 2000 (saison des orages) à cause d'une panne du matériel. A partir de courbes pluie-durée-fréquence (PDF) et de coefficients de Montana (élaborés seulement sur les données des pluviographes), il est possible d'obtenir des ordres de grandeur d'intensités horaires. Les travaux de Kieffer Weisse [1998]

proposent les courbes PDF pour les stations du Versoud, de St-Pierre-de-Chartreuse et de St-Hilaire-du-Touvet (équipées de pluviomètres), ainsi que celles d'Eybens et de St-Martin-d'Hères (équipées de pluviographes). Pour ces deux dernières stations, l'auteur fournit également les coefficients de Montana respectivement de 0,28 et 0,35. Pour la zone du Manival, ses cartographies régionales indiquent une valeur de précipitation horaire (p.188) d'environ 24 mm/h (σ=4 mm) et un coefficient de Montana (p.144) compris entre 0,32 et 0,35 (σ=0,07). Les courbes PDF sont représentées par des droites (une par durée de pluie) sur des graphiques orthonormés dont la particularité est d'avoir une échelle de Gumbel en abscisses correspondant aux périodes de retour (**Cf. Tab. 3-1**). Comme toute droite, elle peut être formulée de la manière suivante :

Tableau 3-1
Correspondance entre temps de retour et variable de Gumbel

Temps de retour (années)	Variable de Gumbel
2	0,37
5	1,50
10	2,25
20	2,97
50	3,90
100	4,60

$$y = ax + b \qquad (3\text{-}1)$$

avec :

y, les précipitations maximales en mm.,

a, le gradex,

x, la variable de Gumbel,

b, le mode.

Le modèle de Montana permet quant à lui d'estimer la valeur de pluie maximale d'une durée non connue à partir de la valeur de pluie maximale d'une durée connue. C'est très utile pour connaître les valeurs correspondant à des durées de 1 heure par exemple, pour des stations équipées uniquement de pluviomètres (pas de temps de 24 heures). L'intensité (I), la durée (d) et la pluie (P) sont liés par la formule suivante :

$$I = \frac{P}{d} \qquad (3\text{-}2)$$

Le modèle de Montana intègre deux coefficients (a et b) pour traduire la même formule :

$$I = \frac{P}{d} = a.d^{-b} \qquad (3\text{-}3)$$

Pour un temps de retour donné (10 ans, 100 ans,…) on a, avec d_1 et d_2, deux durée différentes :

$$\begin{cases} P(d_1) = a.d_1^{1-b} \\ P(d_2) = a.d_2^{1-b} \end{cases} \qquad (3\text{-}4)$$

$$\frac{P(d_1)}{P(d_2)} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1-b} \qquad (3\text{-}5)$$

Avec le coefficient de Montana, n :

$$n = 1 - b \qquad (3\text{-}6)$$

Donc pour passer d'une précipitation maximale d'une durée journalière connue (24h.) à une précipitation maximale d'une durée inférieure inconnue (d en heure), on utilisera les formules suivantes :

$$\frac{P(d)}{P(24h)} = \left(\frac{d}{24}\right)^n \qquad (3\text{-}7)$$

$$P(d) = P(24h) \cdot \left(\frac{d}{24}\right)^n \qquad (3\text{-}8)$$

Les intensités horaires les plus fortes mesurées au Manival, et pour les mêmes périodes au Versoud, sont présentées à la **figure 3-24**. Aucune valeur ne correspond à la même heure de pluie d'une station à l'autre. Pour chacune des stations, une pluie de plus de 30 mm/h a été relevée, mais pas à la même date. Les autres valeurs sont supérieures ou égales à 9 mm/h. Parmi les 16 valeurs retenues pour chacune des deux stations, 5 d'entre-elles seulement se sont produites le même jour (**Cf. Fig. 3-24**). A titre de comparaison, à la station de St-Hilaire-du-Touvet, une pluie horaire de temps de retour 2 ans est de 11 mm/h, si on utilise pour la calculer la courbe PDF et un coefficient de Montana de 0,35 ; elle est de 33,28 mm pour une pluie journalière maximale (24 h.) de temps de retour 2 ans (**Cf. Fig. 3-25** et **Tab. 3-2**). Cette valeur ne doit être considérée que comme un ordre de grandeur car la variabilité entre des stations relativement proches peut-être forte et l'utilisation des données d'une autre station pour un lieu donné est toujours délicate ; Graff [2000] a montré par exemple une différence de 13 mm. pour une pluie horaire (temps de retour 100 ans) entre Eybens et St-Egrève, distantes de seulement 11 km. Des travaux menés de 1987 à 1995 [Desurosne *et al.*, 1996] sur les données pluviographiques d'un transect préalpin, le TPG (Transect de Pluviographes pour l'analyse et la modélisation de Gradients d'altitude) allant de Lyon (Rhône) à Fond-de-France (Isère) en passant par la station de St-Bernard-du-Touvet, a permis d'élaborer la formule suivante pour les pluies horaires :

$$P\ (d=1h, T) = 23{,}2 + 6{,}04\ \mathrm{Ln}\ T \qquad (3\text{-}9)$$

Avec P, d et T, respectivement la précipitation (mm.), la durée (h.) et le temps de retour (ans). Le résultat peut être majoré de 9% pour une station située à 1 300 mètres d'altitude près de celle de St-Bernard-du-Touvet. Si l'on se réfère à cette équation (*3-9*), l'intensité horaire d'une pluie de période de retour 2 ans

Tableau 3-2
Valeurs de pluies journalières et horaires pour les stations pluviométriques et pluviographiques proches du Manival (d'après Kieffer-Weisse, 1998 et Graff, 2000)

Station (24h)	Gradex (mm/24h)	Mode (mm/24h)	Pluie décennale (mm/24h)	Pluie centennale (mm/24h)
St-Pierre-de-Chartreuse (945m)	17,4	36,2	99,4	140,3
Le Versoud (220m)	14,5	22,4	75	109
St-Hilaire-du-Touvet (910m)	14	28,1	79,1	112,1

Station (24h)	Gradex (mm/24h)	Mode (mm/24h)	Pluie décennale (mm/24h)	Pluie centennale (mm/24h)	Coef. Montana
Eybens (Graff)			80	125	
Eybens	15	19	73,5	108,8	0,28
St-Martin-d'Hères	13,4	17,8	66,6	98,1	0,35

Station (1h)	Gradex (mm/h)	Mode (mm/h)	Pluie décennale (mm/h)	Pluie centennale (mm/h)
Eybens (Graff)			25	44
Eybens	6	7,3	30,6	44,7
St-Martin-d'Hères	4,2	6,6	22,8	32,7

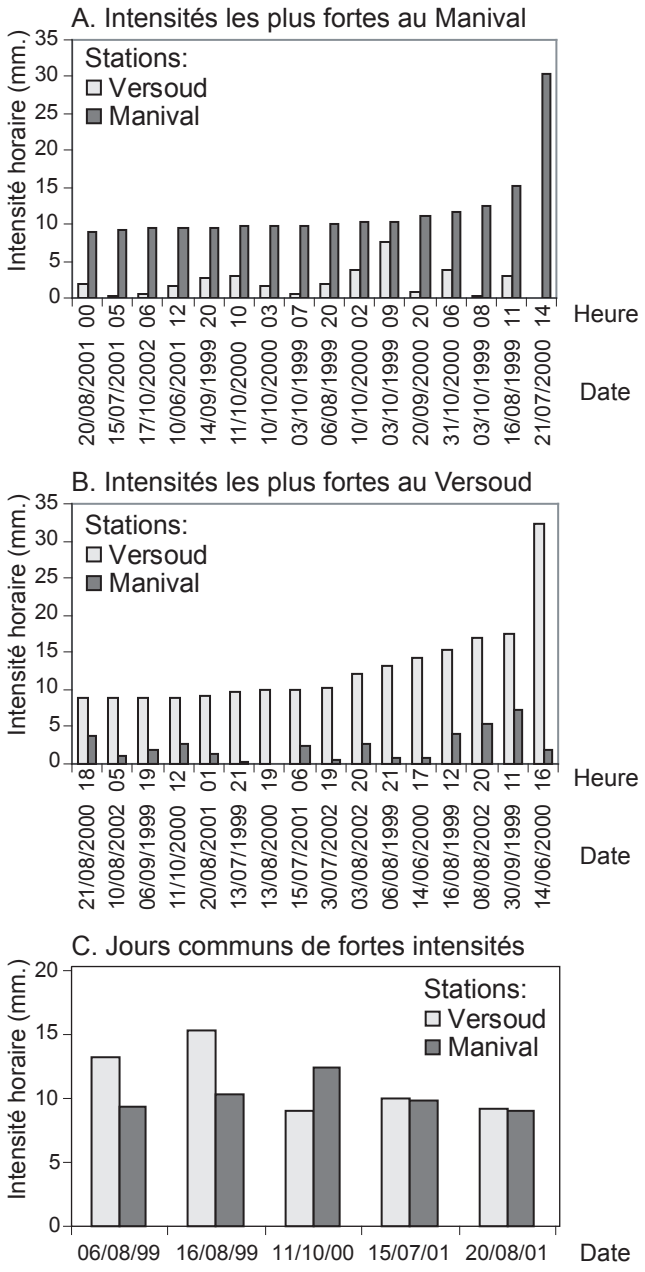


Figure 3-24
Comparaison des précipitations extrêmes aux stations du Versoud et du Manival, pour la période étudiée (entre 1999 et 2002) : 16 intensités horaires les plus fortes au Manival (A) et au Versoud (B), et les jours communs aux deux stations parmi ces fortes intensités (C)

à la station de St-Bernard-du-Touvet est d'environ 30 mm/h. En comparaison, les courbes d'intensité-durée-fréquence (IDF) calculées pour la station de St-Bernard-du-Touvet [Desurosne *et al.*, 1996, Station P11, période d'observation 1987-1995] indiquent une valeur de 25 mm pour une pluie d'une heure avec un temps de retour de 2 ans. Ces différentes analyses des données pluviométriques mettent en relief la difficulté rencontrée pour estimer des intensités horaires à partir du maillage des stations gérées par Météo-France. C'est un problème général en montagne même si certains outils comme les radars météorologiques laissent entrevoir une nette amélioration dans un avenir proche [Givone, 1997 ; Delrieu, 2005]. Pourtant, même si les schémas conceptuels présentés dans la première partie montrent que, dans notre cas, les conditions hydrométéorologiques ne sont pas le moteur principal de la dynamique sédimentaire, les observations prouvent que les précipitations orageuses jouent souvent

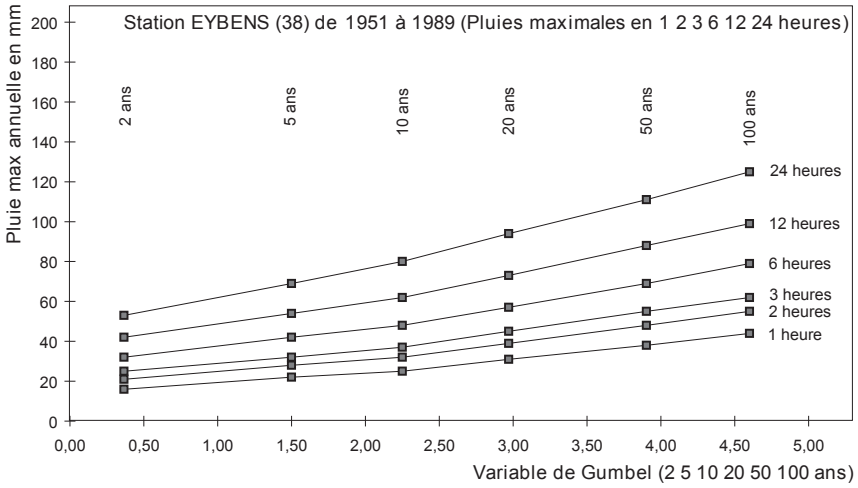


Figure 3-25
Courbes Pluie-Durée-Fréquence (PDF) à la station d'Eybens près de Grenoble (Graff, 2000)

un rôle dans le déclenchement des laves torrentielles ; rôle qu'il sera difficile de quantifier. Seules les données relevées à un pas de temps plus long montrent de bonnes corrélations avec les stations météorologiques avoisinantes.

2.2.4. Compréhension des différents rythmes saisonniers du fonctionnement sédimentaire des ravins

A. Mesures et résultats des variations de volumes sédimentaires

Durant l'année 1999, nous avons fait huit séries de mesures du 13 juillet 1999 au 05 novembre 1999, date après laquelle il y a eu des chutes de neige ; et durant l'année 2000, huit séries également ont été prises du 9 mai 2000 au 16 novembre 2000 (**Cf. Tab. 3-3**). Les mesures ont été préférentiellement effectuées après les précipitations dont les valeurs sont enregistrées par le pluviographe.

Après les premières observations, durant l'été 1999, nous nous sommes rendu compte que sous les matériaux accumulés dans le talweg se trouvait une couche de neige, affleurante lors de la visite du 04 août 1999 et qui n'a disparu qu'après celle de la fin août 1999 ; alors que pour l'année 2000 la neige n'apparaît que pour les deux premières séries de mesure au mois de mai.

Sur les cartes, comme celle de la **figure 3-18**, le névé affleurant est indiqué par un figuré spécifique, ainsi que l'escarpement rocheux. Ce dernier est devenu de plus en plus visible à mesure que le talweg s'est approfondi suite à la purge des matériaux migrant vers l'aval et à la fusion nivale.

Les résultats montrent une forte variation en 1999 puisque nous avons obtenu, entre juillet et octobre, une différence d'altitude de plus de 6 mètres par endroits, équivalant à un volume d'environ 2 000 mètres cubes (**Cf. Fig. 3-26**). La même tendance, de moindre amplitude, a été observée l'année suivante durant le mois de mai (**Cf. Fig. 3-19**). Pour le reste de la saison 1999 (du 18 août au 05 novembre), les mesures de volumes sont stationnaires. Ces mesures sont confirmées par l'observation des photographies sur lesquelles il est possible de retrouver d'une fois sur l'autre la plupart des petits

Tableau 3-3
Observations et mesures d'une zone d'environ 1000 m² dans la partie amont du ravin du Manival, en tête de bassin versant

Date	Volumes relatifs cumulés (m^3)	Variations en volumes spécifiques (m/m^2)	Observations de terrain	Photo-graphies du site
13/07/99	0	---	Névé sous-jacent aux matériaux, non visible Chutes de pierres de l'escarpement sommital Mise en place de repères à la peinture Mise en place du pluviographe	X
04/08/99	-812	-1.103	Affleurements de neige visibles Chutes de pierres de l'escarpement sommital Mouvement du bloc n°6 : retournement et déplacement d'environ 15m vers l'aval	X
12/08/99	-1386	-0.781	Fort creusement au niveau du talweg (rive droite) Chutes de pierres de l'escarpement sommital et petits mouvements de masse dans le talweg Affleurements de neige visibles Mouvement du bloc n°4 Disparition des blocs n°6 et n°3 (Une lave torrentielle a atteint la plage de dépôt)	X
18/08/99	-1717	-0.449	Quelques affleurements de neige visibles Chutes de pierres de l'escarpement sommital Pas de changements sensibles (Recharge en matériaux importante sous le seuil n°2 dans la partie aval du ravin ; apport par des micro laves torrentielles)	X
08/09/99	-1870	-0.209	Pas de neige visible Chutes de pierres de l'escarpement sommital Le talweg (rive droite) semble moins marqué Réapparition du bloc n°3	X
29/09/99	-1870	0.001	Quelques chutes de pierres de l'escarpement sommital	X
12/10/99	-1871	-0.002	Pas de changements sensibles Pas de chutes de pierres de l'escarpement sommital Repérage du bloc n°6 env. 150m à l'aval du site (Recharge en matériaux importante dans la partie aval du ravin)	X
05/11/99	-1878	-0.010	Pas de changements sensibles Quelques chutes de pierres de l'escarpement sommital Désinstallation du pluviographe	X
01/12/99	---	---	Site enneigé Mouvement du bloc n°1 : déplacement d'environ 10m vers l'aval	X
22/03/00	---	---	Observation des névés : pas de matériaux à l'intérieur	?
--/04/00	---	---	Site enneigé Prises de vues obliques par hélicoptère	X
09/05/00	-1237	0.871	Affleurements de neige visibles (rive droite) mais l'épaisseur de neige est plus faible qu'en juillet 99 Chutes de pierres de l'escarpement sommital Mise en place du pluviographe	X
30/05/00	-1552	-0.428	Pas de neige visible Repérage du bloc n°3 env. 250m à l'aval du site	X
03/07/00	-1609	-0.077		X
28/07/00	-1782	-0.235	Perte de données du pluviographe	X
11/08/00	-1907	-0.170	Quelques chutes de pierres de l'escarpement sommital Ajout de repères à la peinture (Recharge en matériaux dans la partie aval du ravin à l'amont du seuil n°1) (Recharge dans la partie aval du torrent à l'amont du seuil n°46, suite à un remaniement anthropique d'une lave déposée l'automne précédent)	X
18/09/00	-1802	0.143	Micro écroulement au niveau de la croix « E »	X
23/10/00	-1678	0.168	Légère reprise des matériaux dans la partie amont du site	X
16/11/00	-1663	0.020	Chutes de pierres importantes de l'escarpement sommital Désinstallation du pluviographe	X

blocs dans la même position. Pour la saison 2000, au contraire, les variations sont plus nombreuses : assez peu de variations durant le mois de juin, puis une décroissance du volume pour atteindre un niveau légèrement inférieur à celui de 1999 jusqu'au mois d'août, et enfin la tendance s'inverse avec une hausse des volumes d'environ 250 m^3 jusqu'à l'arrivée des conditions hivernales en novembre (**Cf. Fig. 3-19**).

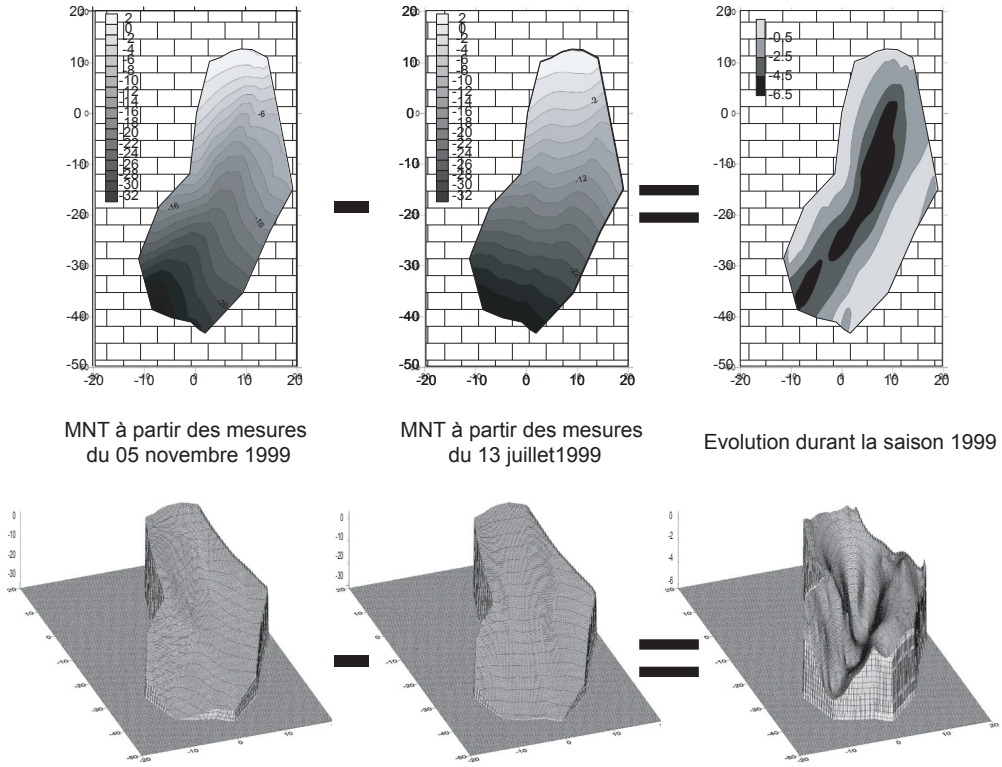


Figure 3-26
Exemple de représentation 2D et 3D des variations de volume de la zone étudiée (haut ravin du Manival) en fonction des Modèles Numériques de Terrain : évolution de la campagne de mesures 1999

B. Rôle et rythme saisonnier des précipitations sur l'évolution de l'état sédimentaire du talweg

La **figure 3-27** montre qu'il n'y a pas de relation significative entre d'une part les variations de volume entre deux observations successives, en excluant les périodes où ces variations risquent d'être liées à la fusion nivale, et d'autre part les cumuls de pluie. Pour qu'ils soient comparables entre-eux, ces cumuls de pluie, correspondant à des périodes de temps variables, sont des moyennes sur 30 jours.

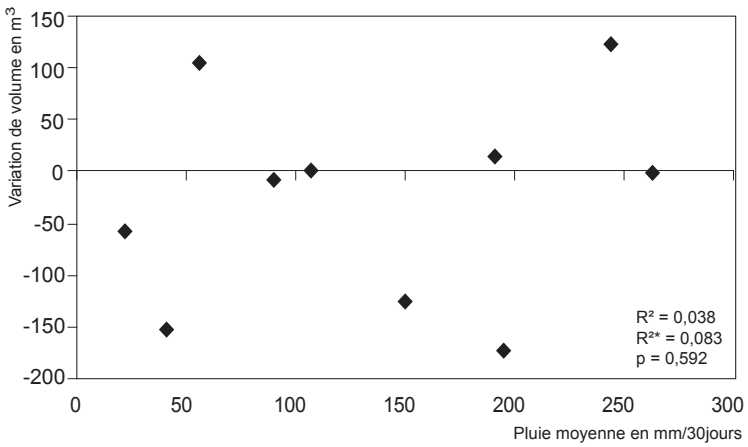


Figure 3-27
Corrélation non significative entre l'évolution du volume sédimentaire du haut ravin du Manival et les précipitations

Les observations faites sur le terrain nous permettent de dire que cela est dû au fait que la pluie peut avoir une double incidence aux effets opposés sur la dynamique sédimentaire du talweg :

- purge du système en cas de précipitations de forte intensité ;
- accumulation dans le système lors de pluies longues mais pas spécialement intenses.

Les conditions météorologiques contrastées que nous avons observées durant les deux années de mesures, ont permis de dégager certaines périodes de l'année où le transfert était prédominant et d'autres périodes où l'accumulation prédominait. Au printemps, une période de fort apport de matériaux a été observée *in situ* mais elle est partiellement voire totalement masquée par le fait que le ravin était alors encombré de neige et que les variations de volume traduisent la combinaison de l'apport sédimentaire et de la fusion du névé. Les photographies permettent de confirmer la présence d'un volume significatif de matériaux : lors de notre première série de mesures le 13 juillet 1999, le névé n'était pas du tout visible car totalement recouvert par une couche uniforme de sédiments (**Cf. Fig. 3-17**). Il est intéressant de remarquer que le volume de juin 2000, alors que le névé avait complètement fondu, était supérieur de plus de 300 m^3 à celui de la fin de l'année précédente, entre septembre et novembre, car cela prouve qu'entre les deux saisons de mesure le ravin s'est rechargé d'au moins 300 m^3 de matériaux. La recharge en sédiments du ravin s'est également effectuée lors des longues périodes de pluie comme cela a été le cas en automne 2000, où le cumul des précipitations du mois d'octobre a été plus de deux fois supérieur à la moyenne mensuelle (**Cf. Fig. 3-19**). Ces observations confirment certaines idées avancées dans les recherches sur l'érosion des milieux périglaciaires, où la production des barres rocheuses semblables à celle du Bec Charvet, nécessite une forte quantité d'eau [Francou, 1988 ; Luckman, 1988]. Celle-ci peut provenir directement des longues précipitations automnales, mais aussi de la fusion nivale ou du dégel de la roche en profondeur au printemps.

Par contraste, les périodes de purge se déroulent souvent l'été lors de fortes précipitations orageuses, comme au mois de juillet 2000, et aussi lors de la fusion du névé qui entraîne les matériaux accumulés au préalable à sa surface, comme nous avons pu l'observer en juillet 1999 et en mai 2000. Ces phases de purges sont la conséquence directe d'une instabilité sédimentaire du système qui suit, à une échelle spatiale plus restreinte, les mécanismes de fonctionnement présentés dans la première partie de cette thèse (**Cf. Fig. 1-16**).

Pour résumer, l'équilibre dynamique du niveau sédimentaire du ravin dépend d'une part de la recharge à partir des versants amont, et d'autre part des purges vers l'aval. La prédominance de l'un des deux processus alterne selon le rythme saisonnier suivant.

Les phases de recharges prédominent :

- au printemps lors du réchauffement et de la fusion nivale,
- à l'automne lors de précipitations de longues durées ;

Les phases de curages prédominent :

- à la fin du printemps ou au début de l'été lors de la fusion du névé dans le ravin,

- dans l'été principalement, lors des précipitations intenses de caractère orageux.

C. Influence de la neige dans le transport des plus gros blocs.

Il nous a semblé intéressant d'enregistrer l'évolution des mouvements des plus gros blocs du ravin. La taille de ceux-ci variaient d'environ 1 à 6 m^3.

Parmi les sept blocs marqués (**Cf. Fig. 3-28**), le plus gros, n°0, d'environ deux mètres de haut, ainsi que le n°2, beaucoup plus petit, n'ont pas bougé. Les autres ont migré de quelques centimètres à près de 300 mètres pour le bloc n°3.

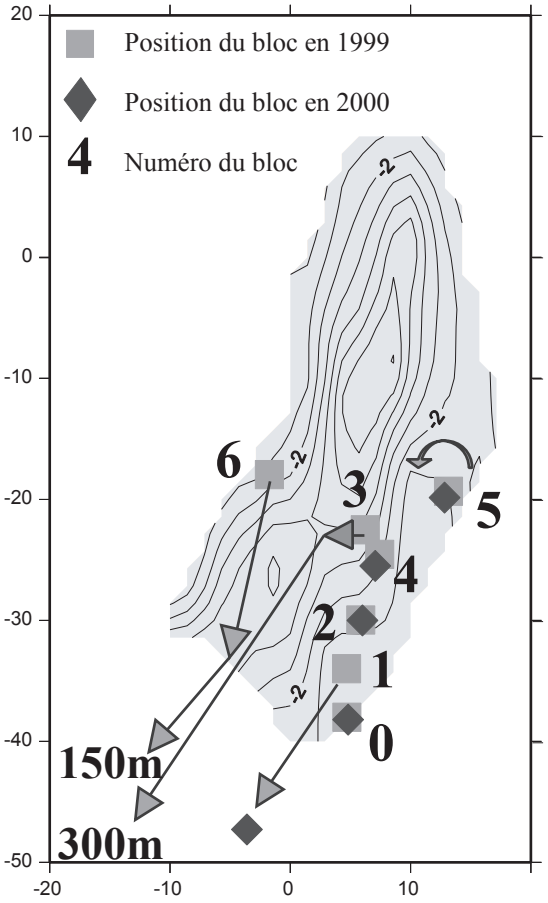


Figure 3-28
Etat des mouvements des plus gros blocs marqués durant les périodes de mesures 1999 et 2000

Le bloc n°6, situé près de la rive droite en relation directe avec le talweg, s'est très rapidement déplacé à l'aval du site de mesure avant le 04 août 1999, puis environ 150 mètres plus bas dans le chenal avant le 12 août 1999.

Les blocs n°3 et n°4, entre la seconde mesure du 04 août 1999 et la troisième mesure du 12 août 1999, ont glissé vers la dépression formée par le talweg. De la même façon le bloc n°5 s'est légèrement déplacé et a eu un mouvement de bascule durant l'hiver 1999-2000, constaté le 09 mai 2000.

Après la mesure du 05 novembre 1999, nous sommes retournés sur le site le 1er décembre 1999 sans prendre de mesures parce qu'il avait neigé. Toutefois, nous avons constaté que le bloc n°1 d'environ 4 ou 5 m^3, pourtant situé dans une partie plus stable du ravin près de la rive gauche, avait migré de plus de dix mètres vers l'aval.

De même, le 30 mai 2000, le bloc n°3 a été aperçu environ 300 mètres à l'aval. Pourtant ce bloc n'était pas plus gros que les autres blocs marqués, et n'avait pas une forme favorisant particulièrement le roulement. Localisé en amont du barrage RTM n°1, ce bloc a été totalement recouvert de sédiments pour apparaître à nouveau en novembre 2003 à la même place.

Il semble donc que les blocs se situant dans le talweg, quelles que soient leurs formes, aient généralement été exportés de plusieurs centaines de mètres vers l'aval lors des phases de purge du ravin. Alors que les blocs situés à proximité du talweg semblent avoir quant à eux été happés par celui-ci à mesure de son enfoncement lors des purges successives. Certains blocs parmi les plus volumineux et étant situés

dans une zone plus stable dans le ravin à l'écart du talweg, ont également pu se mouvoir lorsqu'il y a présence de neige. Dans l'ensemble nous avons observé, bien que cela ne puisse pas facilement transparaître dans les mesures, que la présence de neige au sol (névé ou chute de neige) favorisait le déplacement des blocs (**Cf. Fig. 3-29**). Ceci peut s'expliquer par la formation d'un plan de glissement plus efficace, en particulier lorsque la neige fond et laisse place en surface à une fine pellicule d'eau. Enfin, on peut faire remarquer au-delà de nos observations, que des blocs rocheux provenant d'écroulements peuvent être beaucoup plus volumineux et alors difficilement, ou pas du tout, mobilisables.

Figure 3-29
Exemple, sur un névé, d'un bloc rocheux facilement mis en mouvement (Cliché S.V-C.)

3. Synthèse : prise en compte des phases d'instabilité et détermination d'indicateurs géomorphologiques pertinents

L'objectif de ce chapitre est de faire la synthèse sur la dynamique torrentielle de l'ensemble du bassin versant du Manival afin de dégager des indicateurs permettant d'estimer le volume potentiel érodible pour une lave d'intensité extrême.

En reprenant les observations et les mesures sur les processus relais permettant une recharge sédimentaire du chenal, ainsi que les conditions hydrométéorologiques abordées au début de cette troisième partie, nous nous sommes ensuite intéressés aux phases d'instabilité à différentes échelles temporelles. Tout d'abord sur le long terme (à l'échelle des risques torrentiels que nous étudions) en tentant d'élaborer des bilans sédimentaires sur la période 1960-2000, puis sur le court terme en recensant les événements contemporains de faible volume mais de forte fréquence. Ce cheminement dans l'analyse est illustré par la **figure 3-30**. Cette analyse a finalement permis de déterminer un indicateur géomorphologique principal, la pente, sous la forme de deux indices :

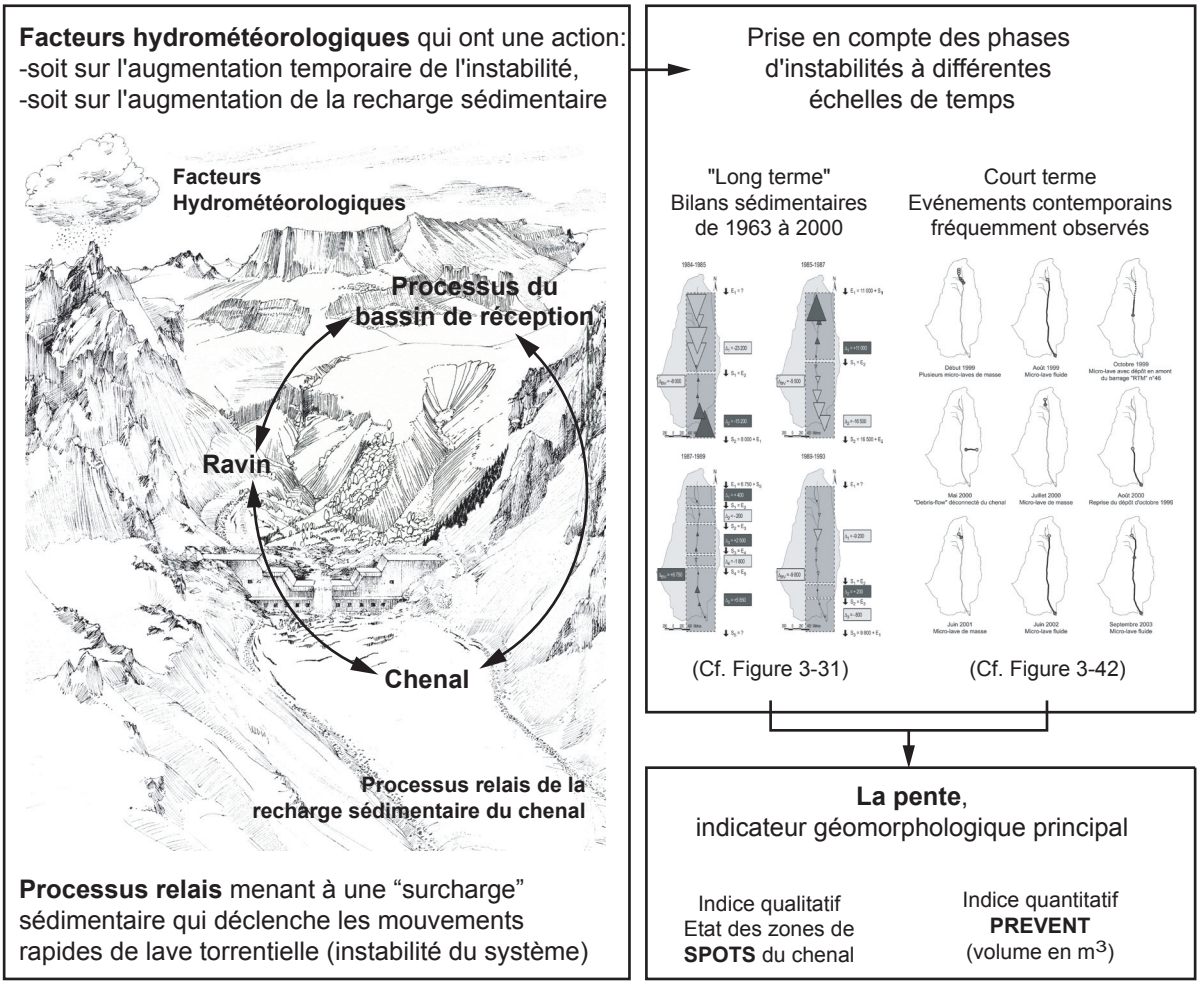


Figure 3-30
Représentation de l'analyse menée sur un bassin versant torrentiel (Manival) afin de prédire le volume d'une lave torrentielle extrême. Après avoir étudié les processus-relais et les intéractions entre bassin de réception, ravin et chenal, ainsi que l'influence des facteurs hydrométéorologiques (à gauche), l'analyse des phases d'instabilité (en haut à droite) a permis d'isoler la pente en tant qu'indicateur géomorphologique principal (en bas à droite) décrit par deux indices primordiaux pour la gestion du risque torrentiel : l'état des zones de Stockage POtentiel Temporaire de Sédiment du chenal (SPOTS) et la PREdiction du Volume de l'EvéNement Torrentiel (PREVENT) (dessin de fond d'après Fischesser, 1982, modif.)

- L'état des zones de SPOTS (Stockage POtentiel Temporaire de Sédiments) du chenal, indice qualitatif qui informe sur l'état de stabilité du système torrentiel,
- La méthode de PREVENT (PREdiction du Volume de l'EvéNement Torrentiel), indice quantitatif qui permet le calcul d'un volume total de sédiments correspondant à l'apport maximal d'une lave torrentielle extrême.

3.1. Analyse de la dynamique sédimentaire : tentative d'établissement de bilans sédimentaires

Avant d'aller plus en avant dans l'exposé de la dynamique sédimentaire du bassin du Manival, nous allons développer la notion de bilan sédimentaire. Bravard et Petit [1997], dans leur ouvrage ont consacré un chapitre entier à cette notion. Deux termes y sont bien différenciés : le bilan d'érosion, d'une part, correspond au résultat final de l'évacuation des matériaux, du continent vers l'océan, quelle que soit l'ampleur du stockage et de la reprise sédimentaire, considérant le bassin versant comme une boîte noire, tandis que le bilan sédimentaire, d'autre part, s'applique à une analyse détaillée des entrées, stockages, reprises et sorties de sédiments au sein du bassin versant, les processus et les flux étant alors abordés de manière interne au système [Bravard et Petit, 1997, p.95].

En géomorphologie, l'établissement de bilans sédimentaires est devenu courant. Ils représentent la quantification des volumes de sédiments fournis par les versants, des matériaux transportés par le réseau de drainage, des stocks déposés dans la zone étudiée, et des flux exportés à l'exutoire. Des bilans de ce type ont été dressés assez tôt dans les petits bassins de montagne [Dietrich et Dunne, 1978].

Les sédiments peuvent avoir pour origine les versants, mais aussi provenir du chenal lors d'érosion de berge ou du fond du lit. Les zones de production réelles sont souvent réduites et d'extention limitée (dans les milieux tempérés). Par exemple, le glissement de terrain de Bonneval dans le Haut-Diois représente seulement 0,1 % de la surface du bassin versant du Bèz, alors que dans les années 1980, il fournissait les trois quarts des matières en suspension de la Drôme [1991].

Plus en aval, on observe un phénomène de cascade sédimentaire. Le fait que les océans reçoivent seulement un quart des sédiments produit par l'érosion prouve qu'il existe de nombreuses zones de dépôt. Les exemples attestant de l'existence de ces zones sont nombreux, que ce soit sur les petits bassins versants agricoles [Trimble, 1981], les petits bassins versants de montagne [Bernard-Allée et Cosandey, 1991 ; Harvey, 1991], ou des bassins versants plus vastes [Hegg *et al.*, 1996 ; Vautier, 2000]. Certains auteurs utilisent le concept de *Sediment Delivery Ratio* qui est le rapport entre, d'une part, la quantité de sédiments transportée et d'autre part, celle fournie par les versants et par l'érosion du chenal [Phillips, 1991]. Dans le chenal, le transport des sédiments est régi par des processus discontinus dans le temps : les sédiments peuvent être stockés durant des périodes très longues, alors que les phases

de déplacement sont courtes et rapides au gré des crues. Ces processus, alternant dépôt et reprise des matériaux, ont été qualifiés de processus-relais [Tricart, 1960 ; Tricart, 1974].

Généralement, le bilan sédimentaire repose sur un découpage de l'espace en sites d'érosion et de dépôt qui sont contrôlés par des processus géomorphologiques homogènes. Mais il faut bien se rendre à l'évidence qu'un bilan quantitatif est particulièrement difficile à équilibrer car il est très rare de pouvoir en mesurer de manière fiable toutes les composantes. C'est certainement pourquoi Reid et Dunne [1996] ont développé une méthodologie utilisant des indices simples et variés permettant l'établissement de budgets sédimentaires rapides. Bien souvent, le stockage est considéré comme un résidu entre la mesure de l'érosion des versants et la mesure des quantités de sédiments à l'exutoire. Il peut pourtant atteindre dans certains cas jusqu'à 85 % du budget total [Kondolf et Graham Matthews, 1991].

Sur un système de référence ouvert à entrée-sortie [Blanc *et al.*, 1989], comme le bassin étudié du Manival, les différents termes du bilan sont les suivants :

- les entrées de matériaux dans le système (E), qui proviennent des processus de versant, de l'érosion des berges ou du fond du chenal ;
- les sorties de matériaux du système (S), qui sont exportés à l'exutoire ;
- les prélèvements de matériaux hors du système (P), qui sont exportés de manière anthropique par curages et extractions mécaniques ;
- les variations internes du stock de matériaux (Δ), qui dépendent de l'équilibre entre les entrées (E) et les exportations (S et P).

Les termes précédents du bilan s'équilibrent donc suivant l'équation ci-dessous :

$$E - \Delta = S + P \qquad (3\text{-}10)$$

Afin de tenter d'élaborer des bilans sédimentaires du bassin versant du Manival, nous avons d'abord recensé les informations disponibles, puis déterminé les zones principales de recharge correspondant aux entrées dans le système de référence.

3.1.1. Informations disponibles permettant l'établissement de bilans sédimentaires

Pour établir des bilans sédimentaires, il est primordial de disposer d'informations quantitatives. Celles que nous avons utilisées proviennent de deux sources principales : les archives du service de la RTM, et des photographies aériennes d'archives dont un grand nombre est géré par l'IGN (Institut Géographique National).

Du fait de sa proximité avec la ville de Grenoble et des bureaux des services concernés par les risques torrentiels d'une part, et des actions générales "d'extinction torrentielle" du service de la RTM (reboisement, site de pépinière, construction de barrages de correction torrentielle) débutées très tôt

dans les années 1880 d'autre part, le bassin versant du Manival a généralement été considéré comme un site bien connu ayant fait l'objet de nombreuses études. Hormis l'étude de Bénévent sur le cône de déjection [Bénévent, 1915], il s'agit de quelques études d'ingénierie et d'expertise menées pour aider les praticiens en charge des risques torrentiels dans leurs choix de gestion [Mathys, 1988 ; Brochot, 1991 ; S.A.G.E., 1993 ; Gruffaz, 1997]. Récemment, un projet de recherche [Brochot *et al.*, 2000a ; Lang *et al.*, 2003] a tenté de dresser une liste exhaustive des documents historiques en rapport avec les événements torrentiels du Manival. Cette étude a montré la qualité variable des informations disponibles sur ce bassin versant et, en particulier le fait qu'elle ne sont que rarement quantitatives.

Pour établir les bilans sédimentaires, les informations quantitatives ont bien entendu été privilégiées. Elles concernent :

- les dates et les volumes des laves torrentielles les plus fortes, connus de manière indirecte par leur arrêt dans le chenal et dans la plage de dépôt.
- les volumes de matériaux prélevés lors des curages réguliers de la plage de dépôt ou des extractions mécaniques dans le chenal.

Les sorties de sédiments du système torrentiel sont connues par les volumes retirés mécaniquement à la plage de dépôt depuis 1992, date à laquelle l'ouvrage terminal hermétique vis-à-vis du transport solide des particules les plus grossières, a été construit. Les volumes extraits du chenal peuvent également être considérés comme des sorties du système. Malheureusement, ces données n'ont pas été répertoriées de manière exhaustive : par exemple, il est manifeste au vu des photographies aériennes et des observations de terrain qu'un fort volume de matériaux a été extrait du chenal à proximité de la baraque forestière (amont du barrage RTM n°30, situé à 1900 mètres de distance en amont de la plage de dépôt) en 1996, or aucun document ne fournit le volume de cette extraction.

Les informations qualitatives sur les laves ne sont pas non plus à négliger. Les plus importantes pour notre étude ont été :

- la description des événements, ainsi que la localisation des zones de départ et des zones d'arrêt des plus fortes laves torrentielles,
- le suivi de l'état des ouvrages, illustré de schémas et de photographies.

L'intérêt d'une description des événements torrentiels est évidente : elle permet de mieux comprendre le fonctionnement de la dynamique du torrent. Par exemple, le volume d'environ 60 000 m^3 de la lave torrentielle de 1968 (**Cf. Tab. 1-11**) semble être surestimé si l'on considère la position et la morphologie de la zone d'arrêt ainsi que les observations pouvant être faites sur les photographies aériennes de l'époque ; mais avec la description de l'événement (Cf. fiche événement en annexe), on apprend qu'une avalanche de neige lourde était mélangée à la lave torrentielle, ce qui explique la surestimation de son volume. De telles descriptions sont d'autant plus utiles que le plus souvent aucune donnée sur le volume n'est disponible.

Le suivi d'état des ouvrages à différentes dates est également précieux car il est illustré de photographies des barrages qui indiquent leur niveau d'enfouissement par une visualisation du pied de chaque ouvrage. Cela permet de valider les résultats de mesures ou de modélisations à certaines dates.

Les informations provenant des photographies aériennes ont quant à elles un avantage essentiel : elles nous ont permis d'obtenir des données quantitatives qui soient objectives. La plupart des photographies ont été achetées à l'IGN (Institut Géographique National) ; quelques unes, de meilleure qualité, nous ont été prêtés par l'IFN (Inventaire Forestier National) ; et enfin les dernières, d'une bonne qualité, ont été obtenues auprès du bureau d'étude Sintégra (cabinet de géomètre-expert). L'ensemble des photographies utilisées a été répertorié dans le **tableau 2-2**.

Pour élaborer les bilans sédimentaires, les informations disponibles ne nous ont pas toujours permis d'équilibrer correctement les différents termes du budget :

- les entrées ne sont jamais connues, au mieux elles ont pu être déduites lorsque tous les autres termes étaient quantifiés ;
- les sorties et les prélèvements auraient dû être parfaitement connus après la construction de l'ouvrage de la plage de dépôt en 1992, qui stoppe la sortie naturelle des matériaux. Toutefois nous avons vu que ces informations n'étaient pas exhaustives et la quantification de ces termes n'a été que partielle ;
- les variations du stock sédimentaire ont été mesurées sur les photographies aériennes et ont donc été très bien quantifiées en fonction des dates disponibles.

3.1.2. Alimentation sédimentaire du chenal

A. Origines principales des apports

La cartographie synthétique des apports sédimentaires des versants élaborée précédemment (**Cf. Fig. 3-15**) a permis de localiser les zones où la production de matériaux est la plus importante. Parmi les dix classes retenues (**Cf. Fig. 3-12**), les plus productrices en fourniture sédimentaire sont les classes n°8, n°9 et n°10 (sols faiblement végétalisés reposant sur des roches peu résistantes), puis viennent les classes n°3, n°4, n°5 et n°7 (sols moins érodibles que les précédents mais soumis à des processus géomorphologiques actifs) ; alors que les classes n°1, n°2 et n°6 sont les moins actives vis-à-vis de l'apport en matériaux (zones déconnectées, fortement végétalisées, ou composées de roches cohésives et résistantes).

La localisation spatiale au voisinage du chenal des classes n°8, n°9 et n°10 est donc particulièrement importante. La classe n°10, la plus productrice, est la plus répandue. A l'intérieur de cette dernière, deux cas de figure liés à la connectivité de ces zones au chenal se distinguent :

- une connexion directe,
- une connexion indirecte, où les sédiments peuvent atteindre le chenal par une suite de processus géomorphologiques qui se relaient pour assurer la migration des sédiments.

Lorsque la zone n'est pas directement connectée au chenal, il existe une cascade sédimentaire comprenant une ou plusieurs zones intermédiaires, sur lesquelles une succession de processus géomorphologiques se relaient dans l'espace et le temps pour acheminer les matériaux jusqu'au chenal. Le taux de recharge de celui-ci dépend du taux de production de la dernière zone, connectée directement au chenal, qui intègre le taux global de production de l'ensemble de la cascade sédimentaire. Lorsque la connexion est indirecte la production sédimentaire est souvent moins importante car en fonction de l'activité de la zone ou des zones intermédiaires, une certaine quantité de sédiments peut-être stockée sur le versant pour une durée plus ou moins longue. Dans le bassin du Manival, ces zones se trouvent en rive gauche, avec des ravines ou des tabliers d'éboulis comme zones intermédiaires. Les quelques piquets métalliques placés en 1999 montrent que les deux éboulis sont très stables (**Cf. Fig. 3-31**). La plupart des ravines sont quant à elles d'assez petites tailles, ne permettant pas le stockage ou l'apport de très grandes quantités de matériaux. La production sédimentaire la plus importante de la classe n°10 provient donc de la rive droite, où les formations géologiques sont les plus sensibles, comme nous l'avons présenté en fin de première partie (**Cf. Fig. 1-21**).

Figure 3-31
Les piquets rouges de 1,5 m qui ont été plantés à des profondeurs de 50 cm et de 1 m dans le tablier d'éboulis, n'ont pas été déplacés au cours de la période d'observation (1999-2003) (Cliché S.V-C.)

La classe n°9 est localisée le long du chenal et son taux de fourniture sédimentaire est fortement lié à l'évolution du niveau altitudinal du talweg. Pour le torrent du Manival, le profil en long est bien stabilisé par les nombreux ouvrages RTM construits dans le chenal, ce qui implique, dans ce cas précis, une assez faible production de la classe n°9. Par contre, en l'absence d'ouvrage, ces zones peuvent fréquemment évoluer en un mouvement de masse important : ce fut le cas en janvier 1991 en rive droite du ravin de la Roche, non aménagé à l'époque, où la cicatrice d'érosion est encore bien visible juste sous le site

d'observation du ravin du Manival (**Cf. Fig. 3-16**). C'est un risque supplémentaire qui peut être pris en compte dans l'élaboration de scénarios extrêmes. On peut également imaginer la déstabilisation d'ouvrages du talweg entraînant le surcreusement de celui-ci, ce qui aurait pour conséquence un risque de déstabilisation généralisée des pieds de versant (classe n°9) par suppression de la butée de pied.

B. Spécificités fonctionnelles des ravins de tête de bassin versant

A l'interface entre versant et chenal, les ravins ont un fonctionnement mixte dominé tantôt par les apports sédimentaires de versant, tantôt par l'évacuation torrentielle des matériaux.

La complexité de fonctionnement dans ce milieu naturel a rendu difficile la quantification des volumes de matériaux et leur évolution dans le ravin de la branche principale. Toutefois les mesures effectuées en 1999 et 2000 ont permis de proposer les caractéristiques majeures du fonctionnement saisonnier du sous-système "ravin":

- Des phases de recharge, dominant lors des cycles de réchauffement printanier (dégel en profondeur) et lors de précipitations importantes d'intensités modérées qui peuvent se produire à l'automne,
- Des phases de "curage" du talweg, dominant lors de la fonte de la neige du site (névé) à la fin du printemps ou en été et lors des précipitations orageuses de fortes intensités souvent très localisées et plus fréquentes en été.

Nous avons constaté une alternance rapide des phases d'apport et des phases d'évacuation des sédiments offrant alors une amplitude de stockage réduite du volume potentiellement mobilisable. La vigueur de la pente constitue certainement l'élément le plus déterminant pour expliquer ce fonctionnement spécifique. Le comportement intermédiaire entre versant et torrent est caractérisé par une respiration sédimentaire des ravins plus rapide que celle du torrent situé en aval avec une capacité de stockage de matériaux plus faible.

Sur le Manival, les sédiments proviennent donc essentiellement de l'escarpement rocheux sommital du Bec Charvet, dans la partie amont du bassin de réception, légèrement décalé vers la rive droite. A l'aval du bassin de réception, le sous-système chenal ne reçoit que peu de matériaux latéralement en provenance directe des versants ou des ravins où les apports sont assez réguliers suivant un rythme intra-annuel ; les transferts de matériaux dans le talweg, de l'amont vers l'aval, y sont prédominants.

3.1.3. Essai de bilans sédimentaires de 1963 à 2000

Sachant d'une part, que les données les plus fiables et complètes dont nous disposons sont les variations du stock sédimentaire du chenal et d'autre part, que les apports sédimentaires principaux proviennent de la partie amont du bassin de réception, le système de référence utilisé dans le calcul des bilans sédimentaires correspond au chenal du Manival délimité à l'aval par le barrage "RTM" n°50 (plage de dépôt) et à l'amont par le barrage "RTM" n°1.

Dans l'élaboration de bilans sédimentaires, la variabilité temporelle et spatiale des épisodes générateurs de l'érosion est importante. A l'échelle des petits bassins versants, la période de retour des événements de transport solide dépend à la fois de caractères climatiques (variables externes) et de seuils géomorphologiques (variables internes). Les observations et les mesures doivent donc être relativisées et placées dans la durée, soit au moins dix ans [Bravard et Petit, 1997]. La période de référence que nous avons utilisée a été déterminée par les photographies d'archives disponibles, composées de douze dates réparties de 1963 à 2000.

Nous avons considéré le chenal comme une zone linéaire de transfert de sédiments avec à l'amont des entrées (E) provenant des zones sources du bassin de réception, et à l'aval, des sorties naturelles ou anthropiques (S et P) à l'exutoire du système étudié. Le découpage du chenal en neuf zones a permis d'obtenir une évolution des variations du stock sédimentaire (Δ) détaillée. A partir de ces zones, nous avons pu déterminer pour chaque période des secteurs fonctionnels dont les limites ont été fondées sur leur tendance au stockage ou au déstockage ; ils ont été numérotés par ordre croissant de l'amont vers l'aval (**Cf. Fig. 3-32**). Sur la base de ces secteurs fonctionnels, les valeurs des entrées ou des sorties, généralement connues par défaut, ont été déduites puis affinées.

A partir des états sédimentaires du chenal calculés pour différentes dates, des cartes ont été dessinées représentant l'évolution du stock de matériaux entre chaque date pour les 9 zones du chenal, ainsi que les entrées et sorties sédimentaires du système torrentiel étudié (**Cf. Fig. 3-33**). Les périodes séparant deux missions photographiques ayant une durée variable, de 1 à 7 ans, les valeurs de la **figure 3-33** ont été ramenées à des valeurs moyennes annuelles. Des budgets sédimentaires exhaustifs ont été très difficiles à établir dans ce type de milieu. Bien que les entrées sédimentaires ne puissent être mesurées avec précision sur le terrain, les sorties devraient être bien connues depuis 1992, date de la construction de la plage de dépôt piégeant l'ensemble des matériaux grossiers. En réalité les curages de la plage de dépôt sont sous-traités à une entreprise privée et la fiabilité des données fournies n'est pas facile à estimer. Quant aux extractions ponctuelles dans le chenal, elles ne sont bien souvent même pas mentionnées… Par déduction, les valeurs d'entrées et de sorties de la **figure 3-33** sont donc des valeurs minimales sauf pour les trois dernières périodes, de 1993 à 2000, où l'on connaît les exportations de sédiments par des prélèvements mécaniques. Pour ces dernières périodes, les bilans équilibrés ont été obtenus grâce aux déductions exposées dans le **tableau 3-4**.

Bien que la période de référence couvre près de 40 ans, l'écart entre les dates utilisées pour établir les états sédimentaires du chenal pose un problème car il peut facilement masquer des fluctuations annuelles. Ces dates ont été imposées par la disponibilité des photographies aériennes d'archives. Le fonctionnement torrentiel étant principalement régi par des crues très brèves entrecoupées de phases beaucoup plus longues où les changements sont moins rapides, la fréquence des photographies et les événements influencent fortement les résultats. En effet, juste après le passage d'une lave torrentielle

la morphologie et l'état de remplissage du chenal auront subi des transformations majeures ; ensuite plusieurs années peuvent passer sans changement géomorphologique important si ce n'est une lente accumulation des sédiments dans certaines portions du talweg. De même au cours de la période étudiée, il peut y avoir un nombre variable de laves torrentielles. Pour illustrer la question de l'échelonnement dans le temps des photographies aériennes, nous avons repris les calculs sans utiliser certaines

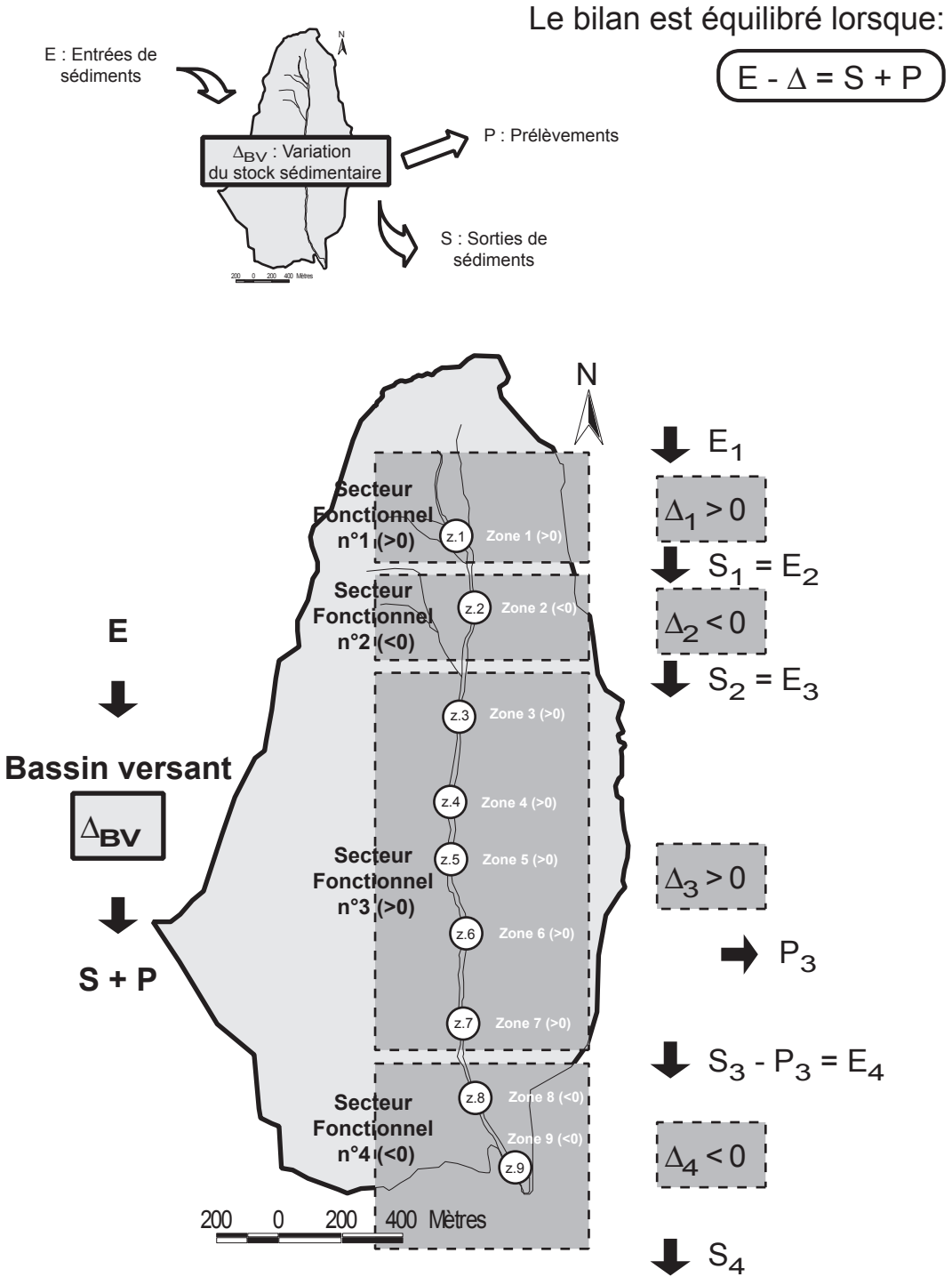


Figure 3-32
Principes de budgets sédimentaires équilibrés pour l'ensemble du bassin versant (en haut) et au niveau de secteurs fonctionnels déterminés par des zones contigües de variations sédimentaires positives ou négatives

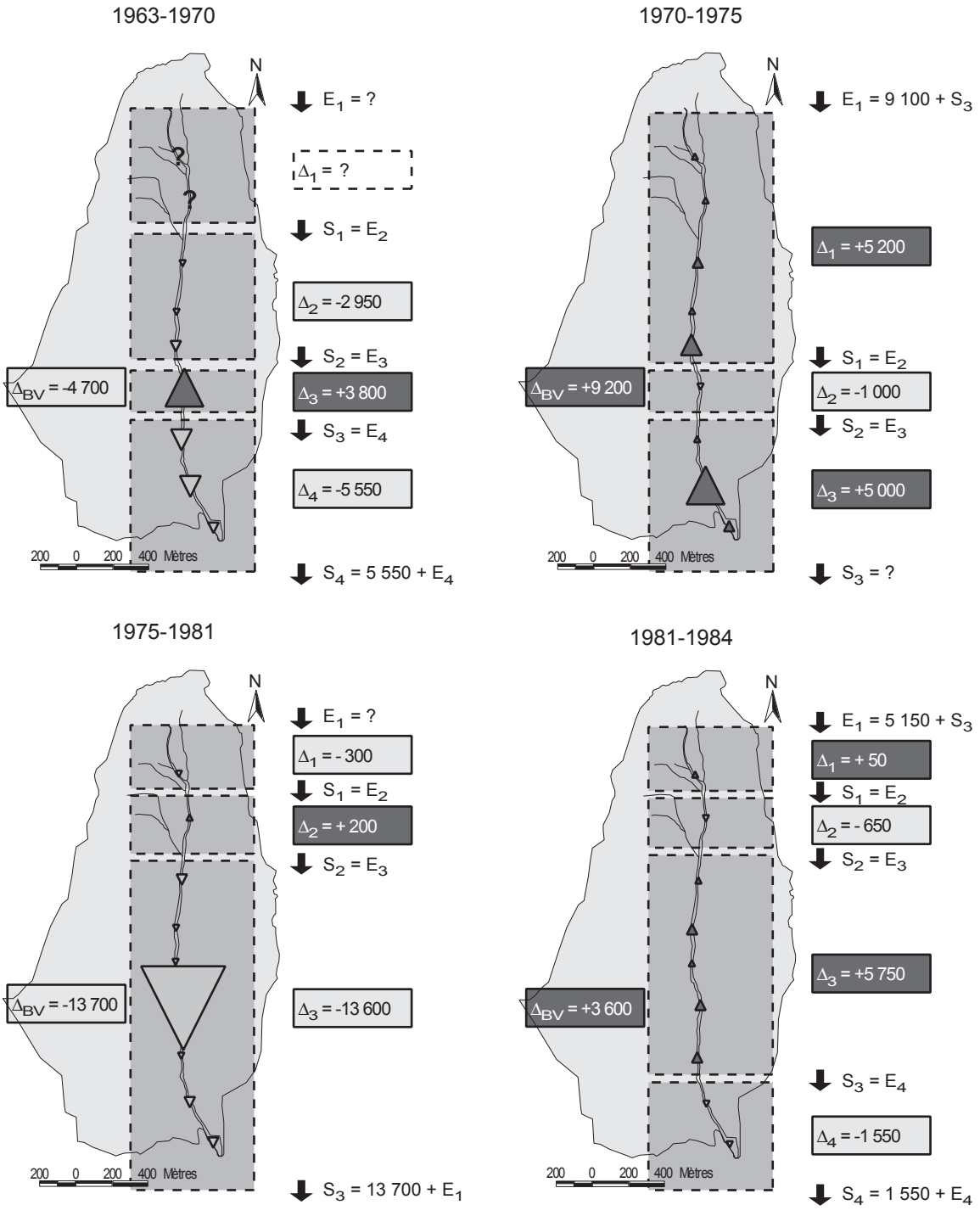


Figure 3-33
Budgets sédimentaires partiels de 1963 à 2000 calculés à partir de l'évolution entre les différentes dates étudiées (Cf. pages suivantes)

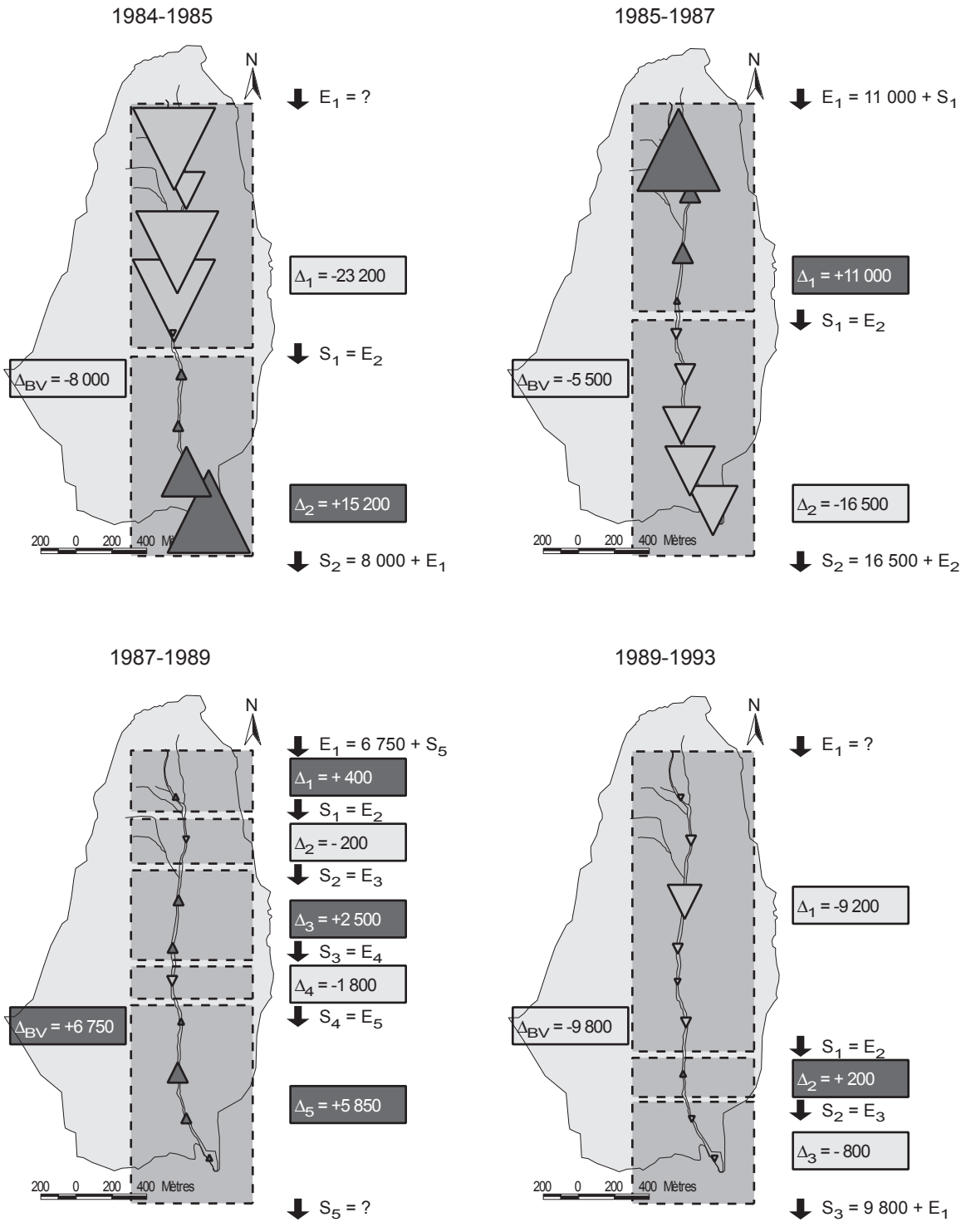


Figure 3-33
Suite

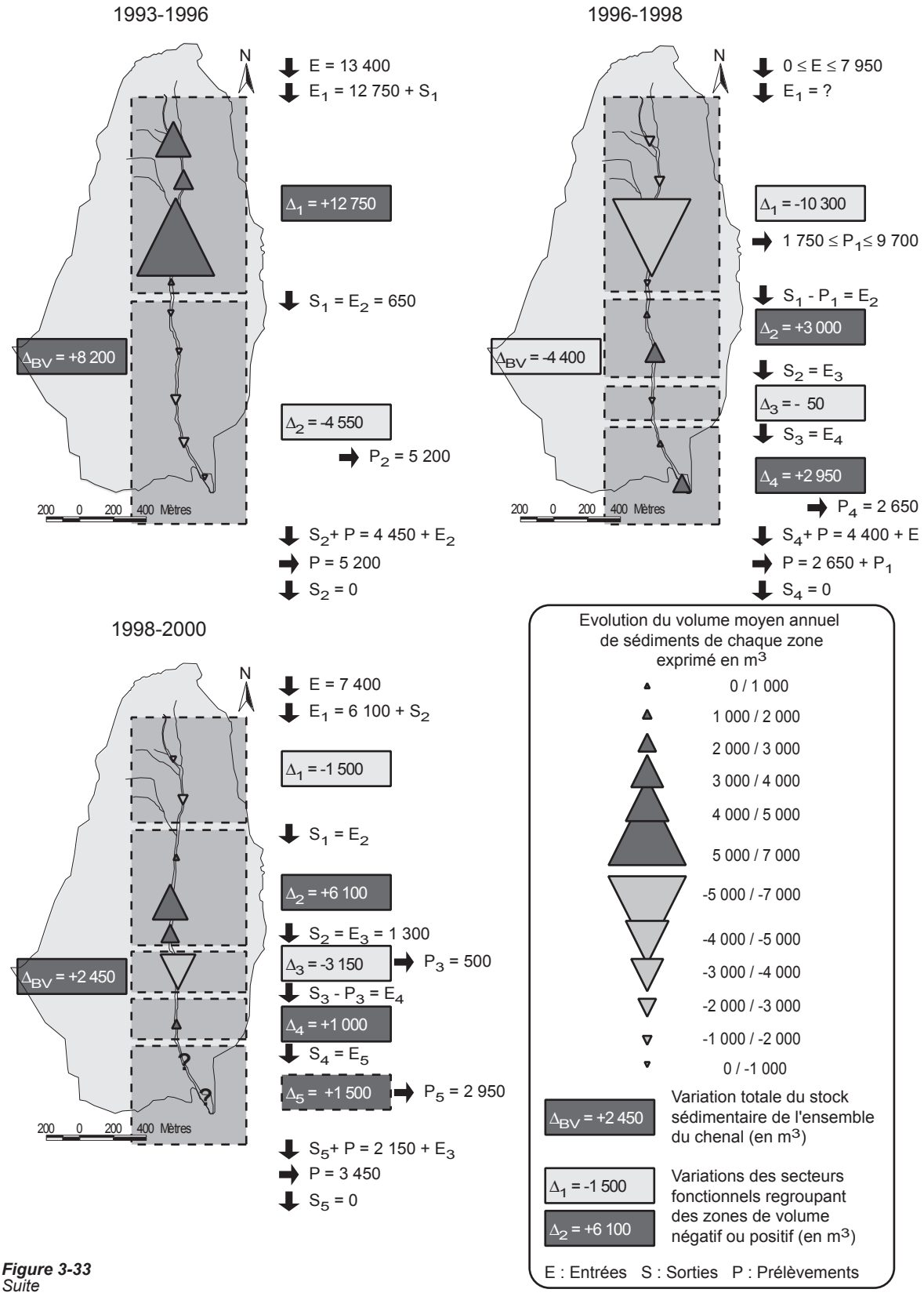


Figure 3-33
Suite

Tableau 3-4
Déductions détaillées ayant permis le calcul des bilans sédimentaires équilibrés (postérieurs à 1992, date de construction de l'ouvrage terminal de la plage de dépôt) pour le chenal du Manival (Cf. Fig. 3-33)

Termes connus	Valeurs déduites (unité : m^3)
Formule de base :	$E - \Delta = S + P$ (avec E, entrée ; Δ, variation de stock ; S, sortie ; P, prélèvement) soit $E = S + P + \Delta$
Période 1993-1996 :	
$E = 12\,750 + S_1$ $\Delta = +8\,200$ $S = 0$ $P = 5\,200$ $S + P = 4\,550 + E_2$ $S_1 = E_2$	**$E =$** $S + P + \Delta = 0 + 5\,200 + 8\,200 =$ **13 400** **$S_1 = E_2$** $= E - 12\,750 = 13\,400 - 12\,750 =$ **650** de même : **$E_2 = S_1 =$** $S + P - 4\,550 = 0 + 5\,200 - 4\,550 =$ **650**
Période 1996-1998 :	
$E = ?$ $\Delta = -4\,400$ $S = 0$ $P = 2\,650 + P_1$ $S + P = 4\,400 + E$	$E = S + P + \Delta = 0 + 2\,650 + P_1 - 4\,400 = P_1 - 1\,750$ Puisque $E \geq 0$ alors $P_1 \geq 1\,750$ de même : $S + P = 4\,400 + E$ donc $P_1 = 4\,400 - 2\,650 + E = 1\,750 + E$ Le prélèvement P_1 est lié aux zones amonts z_1, z_2 et z_3 donc $P_1 \leq -(\Delta_{z1}+\Delta_{z2}+\Delta_{z3})$ soit $P_1 \leq -(-1\,100 - 1\,900 - 6\,700)$ soit $P_1 \leq 9\,700$ $E \leq S + P - 4\,400$, sachant que $P = 2\,650 + P_1$ on a : $E \leq 0 + 2\,650 + 9\,700 - 4\,400$ soit $E \leq 7\,950$ Donc $0 \leq E \leq 7\,950$ et $1\,750 \leq P_1 \leq 9\,700$
Période 1998-2000 :	
$E = 6\,100 + S_2$ $\Delta = 2\,450 + \Delta_5$ $S = 0$ $P = 3\,450$ $S + P = 2\,150 + E_3$ $S_2 = E_3$	$E = S + P + \Delta = 0 + 3\,450 + 2\,450 + \Delta_5 = 5\,900 + \Delta_5$ $S_2 = E_3 = E - 6\,100 = 5\,900 - 6\,100 + \Delta_5 = \Delta_5 - 200$ $E_3 = S_2 = S + P - 2\,150 = 0 + 3\,450 - 2\,150 = 1\,300$ Puisque $\Delta_5 - 200 = 1\,300$ alors **$\Delta_5 =$** $1\,300 + 200 =$ **1 500** et **$E =$** $5\,900 + \Delta_5 = 5\,900 + 1\,500 =$ **7 400**

dates –1984 , 1985, 1989, 1996 et 2000– constituant ainsi des intervalles de temps plus réguliers d'environ 6 ans. La **figure 3-34** permet une comparaison de ces résultats avec ceux déjà présentés sur la **figure 3-11**, utilisant toutes les dates. On constate que sur certaines zones l'espacement entre les photographies a une incidence plus importante : les zones amont, surtout de la zone 1 à la zone 4, sont plus sensibles parce qu'elles sont plus réactives. La partie haute du bassin fonctionne à un rythme sédimentaire plus soutenu que la partie inférieure, ce qui confirme l'analyse que nous avons faite sur la dynamique du ravin au cours des années 1999 et 2000. Cet exemple laisse imaginer des fluctuations qui pourraient être plus importantes que celles mesurées entre les dates disponibles. L'idéal pour obtenir des bilans sédimentaires très fiables est d'utiliser une mission de photographies aériennes effectuée avant l'événement torrentiel, puis une mission faite le plus tôt possible après le passage de la lave torrentielle. Ainsi, on peut dire que plus le laps de temps entre les prises de vue et l'événement est court, en particulier après la crue, plus l'incertitude concernant les bilans sédimentaires sera faible ; c'est ce que met en relief la **figure 3-35** en indiquant (valeurs entre parenthèses) le nombre de jours séparant l'événement des photographies qui lui sont les plus contemporaines. Ce graphique montre diverses difficultés pour élaborer des bilans précis : les événements de 1984 et 1987 n'ont pas de dates précises connues, et il est donc difficile de savoir s'ils ont eu lieu avant ou après les prises de vue photographiques ; trois événements ont eu lieu entre les photographies prises en 1989 et celles prises en 1993, ce qui rend plus difficile l'interprétation des résultats sur les volumes de matériaux transportés ; certaines photographies ont été prises près de deux ans après l'événement comme celles de 2000 ou de 1970, et les mesures effectuées traduisent également les modifications post-événementielles en plus des effets de la crue (bien que cela soit fortement atténué pour 1970 car la lave torrentielle

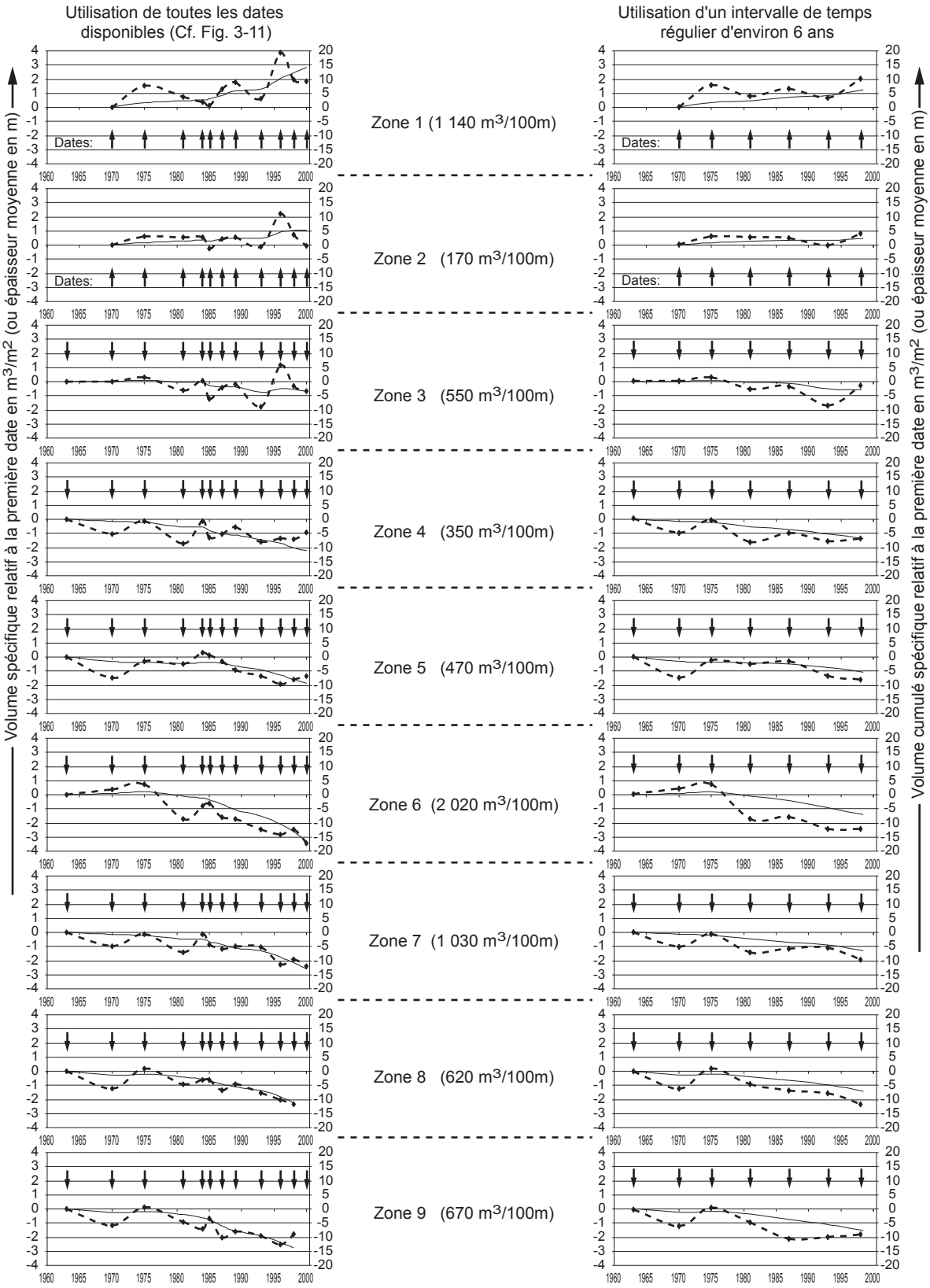


Figure 3-34
Evolution dans le temps des 9 zones du chenal du Manival d'amplitudes homogènes en fonction des dates utilisées : certaines variations sont masquées lorsque l'on n'utilise pas toutes les dates disponibles, particulièrement dans les zones amont, plus réactives

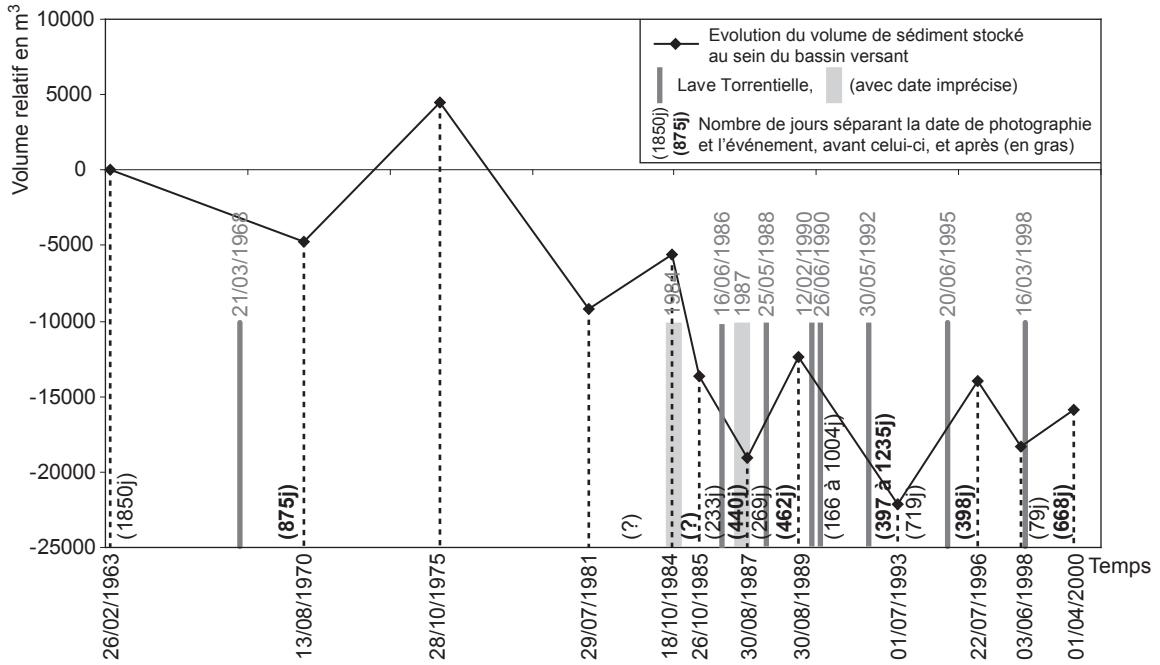


Figure 3-35
Relation entre la date des missions de photographies aériennes ayant permis le calcul des volumes de sédiments stockés au sein du bassin versant du Manival, et la date des événements de lave torrentielle (Cf. Tab. 1-11). Le nombre de jours séparant l'événement des photographies contemporaines à celui-ci (entre parenthèses) donne une indication sur la qualité des bilans sédimentaires : l'idéal étant d'avoir un couple photographique avant l'événement et surtout un autre juste après (valeurs en gras)

de 1968 avait un volume élevé de l'ordre de 60 000 m^3). Cependant, nous avons considéré que le nombre relativement élevé de photographies utilisées et leur espacement variable dans le temps a fourni suffisamment d'informations pour appréhender le fonctionnement de la dynamique sédimentaire du Manival vis-à-vis des événements torrentiels. Par ailleurs, la présence humaine sur le torrent (service de la RTM) exclut que l'on puisse manquer des épisodes de rééquilibrage sédimentaire majeurs.
Le changement de gestion par le service de la RTM entre les années 1970 et les années 1990, déjà évoqué au début de ce chapitre, est nettement visible par la baisse du volume global de matériaux stockés dans tout le chenal (**Cf. Fig. 3-35**), ainsi que sur les bilans sédimentaires (**Cf. Fig. 3-33**), en particulier pour les zones situées à l'aval du barrage RTM n°44.

Dans le **tableau 3-5** les mouvements de sédiment ont été synthétisés par périodes. Par recoupement des informations, nous avons essayé de confirmer ou d'estimer les volumes de laves torrentielles. Les résultats sont assez cohérents mais pointent tout de même le problème du niveau de précision et de fiabilité des informations non photographiques qui sont disponibles, qu'elles soient historiques ou récentes.

A partir des budgets sédimentaires, il a été possible de proposer des ordres de grandeur de taux d'érosion. Une technique très répandue pour estimer des taux d'érosion consiste à diviser la charge sédimentaire par la surface du bassin versant. Cette approche suscite deux problèmes trop rarement pris en compte :

Tableau 3-5
Estimations des volumes sédimentaires et des laves torrentielles à partir des budgets sédimentaires partiels (Bilan Sed.) et des archives de la RTM (Estim. RTM) au torrent du Manival

Période	Mouvement de sédiment	Estimations des volumes de sédiments et de laves torrentielles
1963-1970	Entrée Sortie Mouvement interne	? ≥ 38 850 m^3 (+ entrées et transit) *Estim. RTM* : lave torrentielle de 60 000 m^3 *Bilan Sed.* :partie des dépôts visibles dans la zone 6
1970-1975	Entrée Sortie	≥ 46 000 m^3 ?
1975-1981	Entrée Sortie	? ≥ 82 200 m^3 (+ entrées)
1981-1984	Entrée Sortie	≥ 15 450 m^3 ≥ 4 650 m^3 (+ entrées et transit)
1984-1985	Entrée Sortie Mouvement interne	? ? + 8 000 m^3 (+ entrées) *Estim. RTM* : lave torrentielle de 15 000 m^3 *Bilan Sed.* : mouvement de 23 200 m^3 de matériaux dont 15 200 m^3 se sont déposés dans les zones 6 à 9
1985-1987	Entrée Sortie Mouvement interne	≥ 22 000 m^3 ≥ 33 000 m^3 *Estim. RTM* : 2 laves torrentielles *Bilan Sed.* : pouvant être estimées à environ 30 000 m^3
1987-1989	Entrée Sortie Mouvement interne	≥ 13 500 m^3 ? *Estim. RTM* : 1 lave torrentielle *Bilan Sed.* : d'un volume ≤ 13 500 m^3
1989-1993	Entrée Sortie Mouvement interne	? ≥ 39 200 m^3 (+ entrées) dont 9 800 m^3 extraits de la plage de dépôt et plus de 6 000 m^3 extraits directement du chenal *Estim. RTM* : 2 laves torrentielles en 1990 (? + 12 000 m^3) et 1 lave torrentielle en 1992 *Bilan Sed.* : d'un volume < 10 000 m^3 pour la lave de 1992
1993-1996	Entrée Sortie Mouvement interne	= 40 200 m^3 = 15 600 m^3 extraits à la plage de dépôt *Estim. RTM* : 1 lave torrentielle *Bilan Sed.* : d'un volume ≤ 10 900 m^3
1996-1998	Entrée Sortie Mouvement interne	[0 m^3 ; 15 900 m^3] [8 800 m^3 ; 24 700 m^3] dont 5 300 m^3 extraits de la plage de dépôt et entre 3 500 m^3 et 19 400 m^3 extraits directement du chenal dans la zone 3 *Estim. RTM* : lave torrentielle de 6 000 m^3 *Bilan Sed.* : d'un volume ≤ 11 900 m^3
1998-2000	Entrée Sortie	= 14 800 m^3 = 6 900 m^3 dont 5 900 m^3 extraits de la plage de dépôt et 1 000 m^3 extraits directement du chenal

- la division par la surface totale du bassin versant sous-estime forcément le taux d'érosion calculé, car les zones de production sédimentaire sont généralement d'extension très réduite et ne représentent qu'une toute petite partie de la surface du bassin. Ce phénomène est d'autant plus accentué que la taille du bassin est grande [Descroix, 1994 ; Latulippe et Peiry, 1996] ;
- les taux d'érosion peuvent fluctuer de manière importante au cours du temps du fait de la fourniture irrégulière et de la charge sédimentaire variable où il est difficile de prendre en compte les événements extrêmes. La période utilisée influence donc fortement les résultats.

Néanmoins, pour calculer les taux d'érosion nous avons utilisé les volumes de matériaux divisés par les surfaces réelles des zones de production sédimentaire connectées au chenal, d'une part, et par la surface réelle totale du bassin versant concerné, d'autre part. La première valeur permet une comparaison avec la plupart des références bibliographiques concernant les taux d'érosion, alors que la

Tableau 3-6
Estimation des taux d'érosion du bassin du Manival. La plupart des valeurs sont des estimations minimales (>) sauf pour les valeurs d'entrées dans le système après 1992 où les bilans sédimentaires sont équilibrés (=, ou < pour la période 1996-1998) (Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005)

Entrées (en m/an) — calculs utilisant la surface totale du bassin (surfaces réelles)

	1970-1975	1981-1984	1985-1987	1987-1989	1993-1996	1996-1998	1998-2000
Amont du barrage RTM n°10	0,0018	?	**0,0178**	0,0015	**0,0108**	**0,0152**	?
Amont du barrage RTM n°44	0,0019	0,0009	0,0068	0,0020	0,0080	0,0033	0,0009
Amont du barrage RTM n°47	0,0024	0,0016	?	0,0006	?	?	0,0026
Amont du barrage RTM n°48	0,0023	0,0018	?	0,0020	?	?	?
Amont de la plage de dépôt	0,0021	0,0008	?	0,0016	**0,0031**	0,0018	0,0017
	>	>	>	>	=	<	=

Entrées (en m/an) — calculs utilisant la surface érodible connectée au chenal (surfaces réelles)

	1970-1975	1981-1984	1985-1987	1987-1989	1993-1996	1996-1998	1998-2000
Amont du barrage RTM n°10	0,0018	?	0,0178	0,0015	0,0108	0,0152	?
Amont du barrage RTM n°44	0,0064	0,0030	**0,0234**	0,0068	**0,0275**	0,0112	0,0032
Amont du barrage RTM n°47	0,0100	0,0065	?	0,0023	?	?	0,0109
Amont du barrage RTM n°48	0,0136	0,0109	?	0,0121	?	?	?
Amont de la plage de dépôt	**0,0200**	0,0080	?	0,0147	**0,0291**	0,0173	0,0161
	>	>	>	>	=	<	=

>: valeurs minimales
<: valeurs maximales
=: valeurs exactes

Extractions (en m/an) — calculs utilisant la surface totale du bassin (surfaces réelles)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Moyenne
A la plage de dépôt	0,0011	0,0012	0,0009	0,0016	0,0011	0,0005	0,0007	0,0007	0,0007	0,0002	0,0002	**0,0008**
	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>

Extractions (en m/an) — calculs utilisant la surface érodible connectée au chenal (surfaces réelles)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Moyenne
A la plage de dépôt	**0,0104**	**0,0110**	0,0084	**0,0153**	0,0101	0,0048	0,0067	0,0066	0,0062	0,0017	0,0018	**0,0076**
	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>

seconde nous parait refléter de manière plus juste la réalité. Quant à la variabilité dans le temps, nous avons été obligés de nous référer aux périodes et aux dates étudiées.

Le **tableau 3-6** montre les résultats des estimations de taux d'érosion. Les calculs, qui ont été effectués avec les entrées de sédiments sont des valeurs minimales, sauf pour la période 1996-1998 (valeurs maximales). Pour la petite zone du ravin observée en 1999 et 2000, on note une recharge minimum de 300 m^3 entre les deux années et de 250 m^3 à l'automne 2000 soit, pour une surface réelle de 130 000 m^2, un taux d'érosion supérieur ou égal à 4,2 mm/an. Pour le plus petit découpage du bassin, en amont du barrage RTM n°10, les taux d'érosion les plus importants sont de plus de 10,8 à plus de 17,8 mm/an. Pour les découpages plus vastes (amont des barrages RTM n°44, 47, 48 et plage de dépôt) le taux d'érosion dépasse 29,1 mm/an lorsque l'on utilise uniquement les zones de production sédimentaire, alors que ce taux avoisine 2 mm/an si l'on utilise la surface de l'ensemble du bassin concerné. En utilisant les données de volumes de matériaux extraits annuellement dans la plage de dépôt de 1992 à 2002, les valeurs les plus fortes sont de plus de 10,4 à 15,3 mm/an, et la moyenne sur dix ans est 7,6 mm/an. Ces valeurs sont sous-estimées car elles ne prennent pas en compte les curages dans le chenal et ne représentent donc pas l'ensemble des exportations hors du système torrentiel. Sur le Manival, la source principale des sédiments est l'escarpement rocheux sommital du Bec Charvet formé d'alternances de couches plus ou moins calcaires et marneuses, avec de nombreux plis et failles. De nombreuses études [Saunders et Young, 1983] montrent que les taux pour des roches non consolidées sont généralement de 2 mm/an et plus. Nos résultats sont souvent bien supérieurs [Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005], bien que certains taux extrêmes dans des conditions lithologiques proches atteignent

30 mm/an [Francou, 1988 ; Dedkov et Moszherin, 1992 ; Delannoy et Rovera, 1996 ; Mathys *et al.*, 1996 ; Rovéra, 1997]. La raison de ces valeurs globalement faibles est certainement l'utilisation de l'ensemble de la surface du bassin pour le calcul du taux d'érosion, ce qui est fréquent dans ce type d'études. C'est le cas d'une étude sur des torrents suisses [Spreafico et Lehmann, 1994] où la taille des bassins varie de 3 à 20 km². Ce travail montre par ailleurs qu'un rapport de 1 à 40 peut exister entre le taux d'érosion calculé sur plusieurs années et celui calculé lors d'un seul événement torrentiel. Pech [1986] a quant à lui mesuré la production annuelle de matériaux sur des parcelles localisées sur des versants de taille inférieure à un hectare. Les taux de production annuels d'escarpements rocheux peuvent alors atteindre 16 mm/an, 21 mm/an voire 500 mm/an. Plus l'échelle de temps ou d'espace étudiée est restreinte, plus la possibilité d'obtenir de forts taux d'érosion est élevé, ce qui met en évidence le caractère irrégulier de la production sédimentaire, tant dans le temps que dans l'espace.

3.1.4. Rôle des facteurs hydrométéorologiques sur la recharge sédimentaire

A. Données utilisées

Nous avons vu que les facteurs hydrométéorologiques pouvaient avoir un rôle dans le déclenchement des événements torrentiels, en particulier les précipitations à caractère orageux ; mais elles peuvent également avoir un rôle indirect en favorisant l'activité des processus de recharge sédimentaire (**Cf. Fig. 3-30**). Suite aux observations de terrain, nous avons constaté que seules trois saisons sur l'année avaient une activité torrentielle conséquente (printemps, été, automne), la saison hivernale ayant tendance à "geler" l'activité des processus géomorphologiques. Toutefois les conditions hivernales jouent un rôle non négligeable de préparation du matériel détritique qui va conditionner l'importance de la recharge printanière. La saison du printemps va donc être analysée à l'aide de données recueillies à la station nivologique du col de Porte, située à proximité de Grenoble en entrant dans le massif de la Chartreuse à 1 325 mètres d'altitude [David et Martin, 1997]. Les données des stations pluviométriques situées à proximité du Manival (St-Pierre-de-Chartreuse, St-Bernard-du-Touvet, St-Hilaire-du-Touvet, et St-Martin-d'Hèrres près de Grenoble) (**Cf. Fig. 3-20**) seront utilisées pour les deux autres saisons, l'été et l'automne. Pour résumer, nous avons étudié le rôle des facteurs hydrométéorologiques sur la recharge sédimentaire en découpant la période d'étude (1963 à 2000) en saisons :

- Le printemps, reflet de l'activité hivernale, où l'action de recharge prédomine (sauf lorsque l'action d'un névé favorise la purge). Les données utilisées sont celles du col de Porte : précipitations sous forme de pluie et de neige. Elles comprennent systématiquement la période complète de l'enneigement, et dans tous les cas au moins les mois de décembre à avril. La date de début des données la plus précoce est la dernière décade de septembre, alors que la date de fin la plus tardive est la première décade de juin ; nous avons systématiquement retenu la période d'octobre à mai. La source des données est la note de centre n°9 du Centre d'Etude de la Neige (CEN) de 1960 à 1996 [David et Martin, 1997], puis de 1996 à 2004, directement auprès du CEN (précipitations corrigées en fonction du vent et de la température de l'air).

- L'été, reflet de la saison orageuse à influence continentale, où l'action de purge prédomine. Les données utilisées sont celles des mois de juin, juillet et août, des stations pluviométriques proches du Manival.
- L'automne, reflet des pluies longues à influence océanique, où l'action de recharge prédomine. Les données utilisées sont celles des mois de septembre, octobre et novembre, des stations pluviométriques proches du Manival.

Bien que la température ait certainement un rôle dans la préparation des matériaux détritiques, en particulier lors des alternances de gel et de dégel en surface ou en profondeur dans la roche, nous avons volontairement négligé ce paramètre en considérant que son action était toujours importante quelle que soit la saison hivernale. Il nous semble que le paramètre primordial à prendre en compte durant cette saison est la quantité d'eau qui va avoir une action directe ou indirecte très importante sur les matériaux [Francou, 1988 ; Luckman, 1988]. Cette action est d'autant plus importante que la lithologie du bassin du Manival est en grande partie composée de marnes, et donc d'une grande quantité d'argiles qui peuvent mobiliser des matériaux détritiques en se gonflant d'eau ou au contraire en se rétractant lors des périodes plus sèches.

B. Analyse des données

Les **figures 3-36** à **3-39** présentent les données relevées à la station nivologique du col de Porte superposées aux valeurs de variation du stock de sédiments mobilisable dans le chenal, pour l'ensemble du Manival (amont de la plage de dépôt) et pour chacune des 9 zones homogènes. Quatre variables météorologiques ont été retenues : les précipitations sous forme de neige (**Cf. Fig. 3-36**), les précipitations sous forme de pluie (**Cf. Fig. 3-37**), les précipitations totales, pluie ou neige (**Cf. Fig. 3-38**), et le rapport des précipitations sous forme de pluie sur les précipitations sous forme de neige (**Cf. Fig. 3-39**). La variation des précipitations sous forme de neige ne suit celle du stock sédimentaire du chenal qu'après 1981 ; la relation entre les deux variations est bien meilleure pour les zones amont du chenal (zones 1 à 4) pour l'ensemble de la période (1963 à 2000) alors qu'à l'aval (zones 5 à 9) elle n'est pas visible, si ce n'est après 1990. Pour les précipitations sous forme de pluie, ou pluie et neige cumulées, il n'y a pas de lien visible. Le rapport des précipitations sous forme de pluie sur les précipitations sous forme de neige, qui est élevé au début des années 1990, traduisant les faibles précipitations neigeuses, indique une relation inverse sauf pour la période 1993-1996, caractérisée par les plus fortes précipitations pluvieuses. Cette relation conforterait l'idée que la neige joue un rôle non négligeable dans l'apport d'eau et indirectement sur la recharge sédimentaire. Les **figures 3-40** à **3-42** présentent les mêmes variations avec cette fois-ci les données des stations pluviométriques proches du Manival (St-Pierre-de-Chartreuse, St-Hilaire-du-Touvet et St-Bernard-du-touvet, St-Martin-d'Hères) pour les trois saisons qui nous intéressent : printemps (et hiver, de décembre à mai) (**Cf. Fig. 3-40**), été (de juin à août) (**Cf. Fig. 3-41**), et automne (septembre à novembre) (**Cf. Fig. 3-42**). La courbe des précipitations hivernales, qui préparent l'activité torrentielle du printemps, suit assez bien les variations du stock sédimentaire à partir

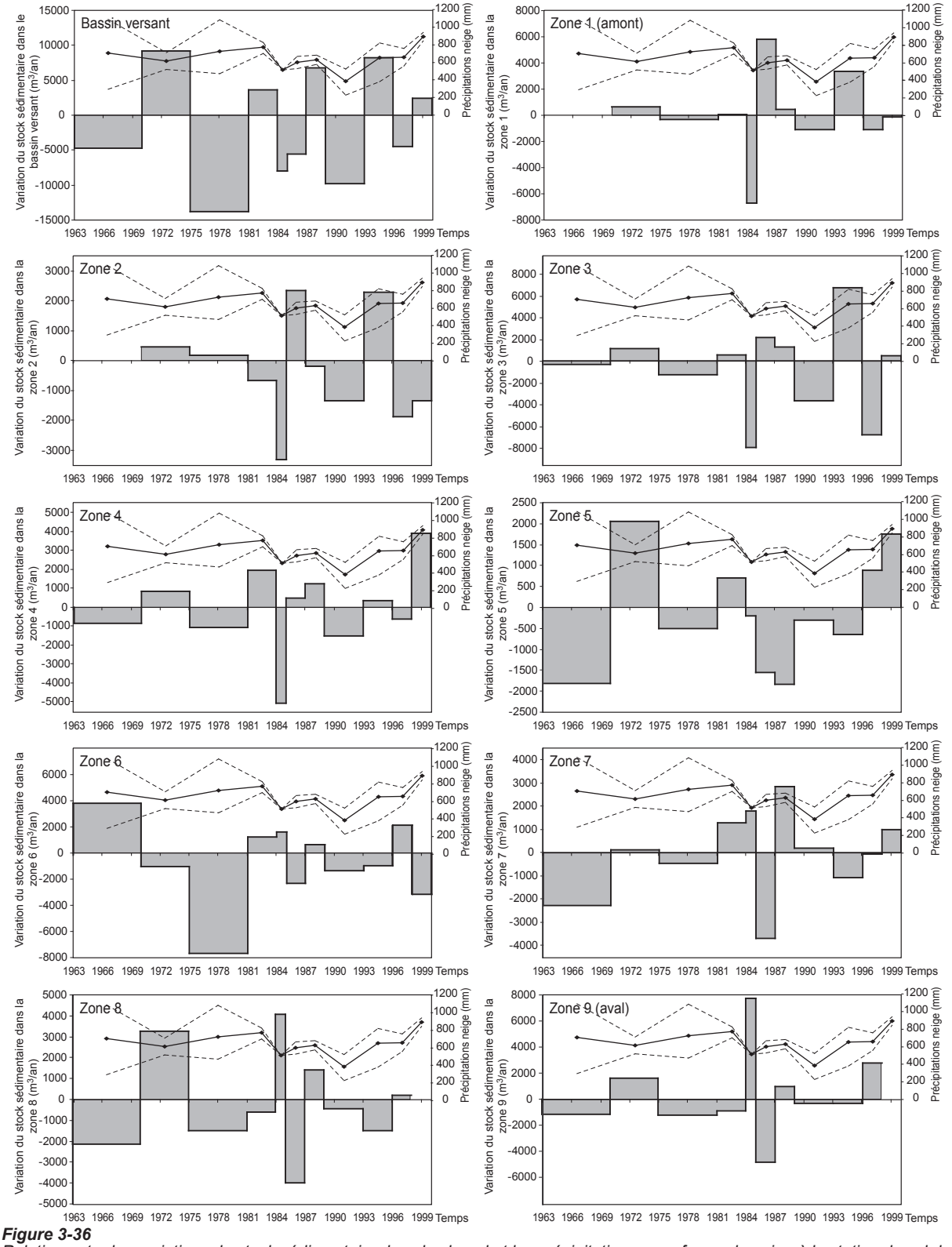


Figure 3-36
Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations sous forme de neige à la station du col de Porte. Le trait plein représente la moyenne de la période, alors que les pointillés indiquent la valeur minimum et maximum

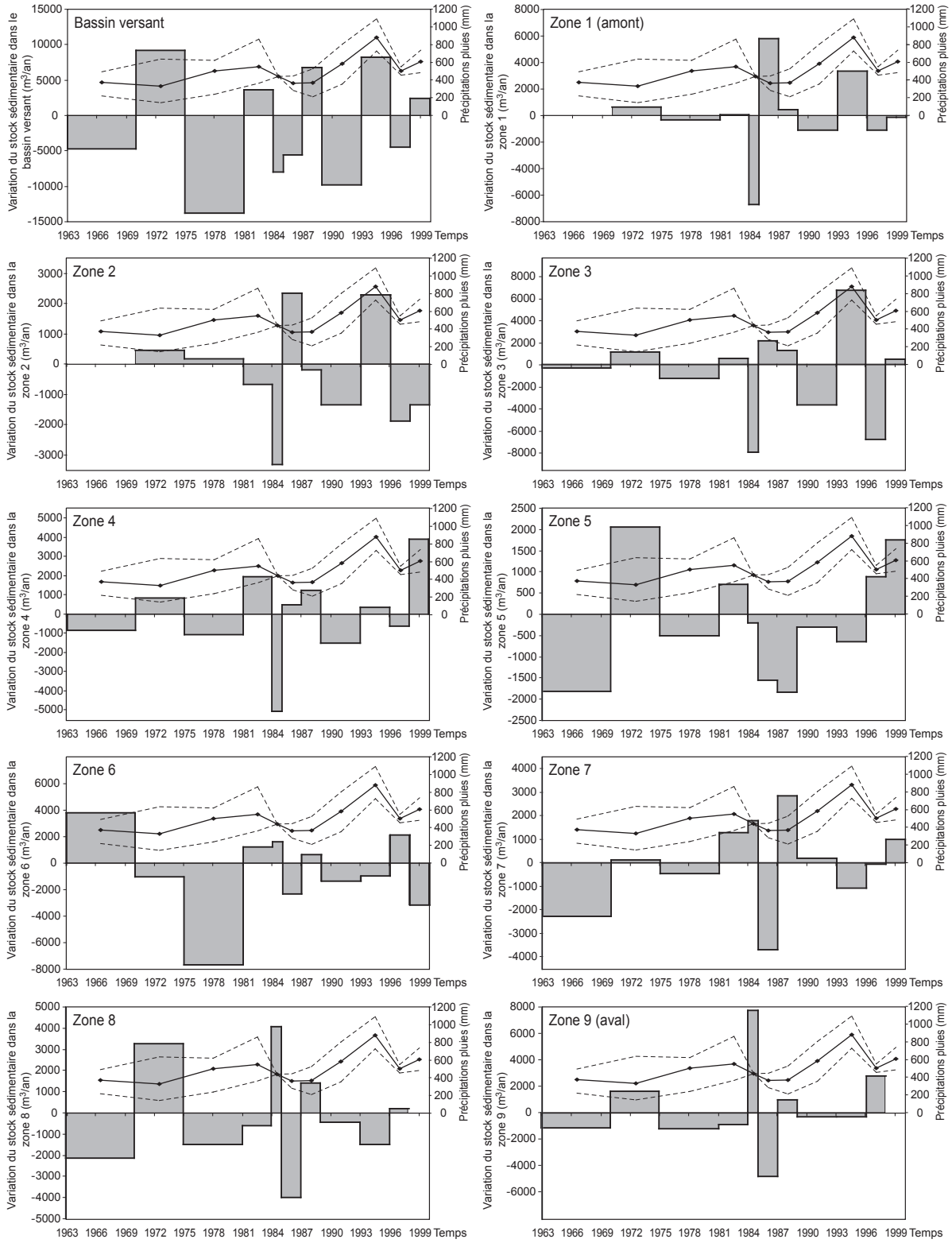


Figure 3-37
Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations sous forme de pluie à la station du col de Porte. Le trait plein représente la moyenne de la période, alors que les pointillés indiquent la valeur minimum et maximum

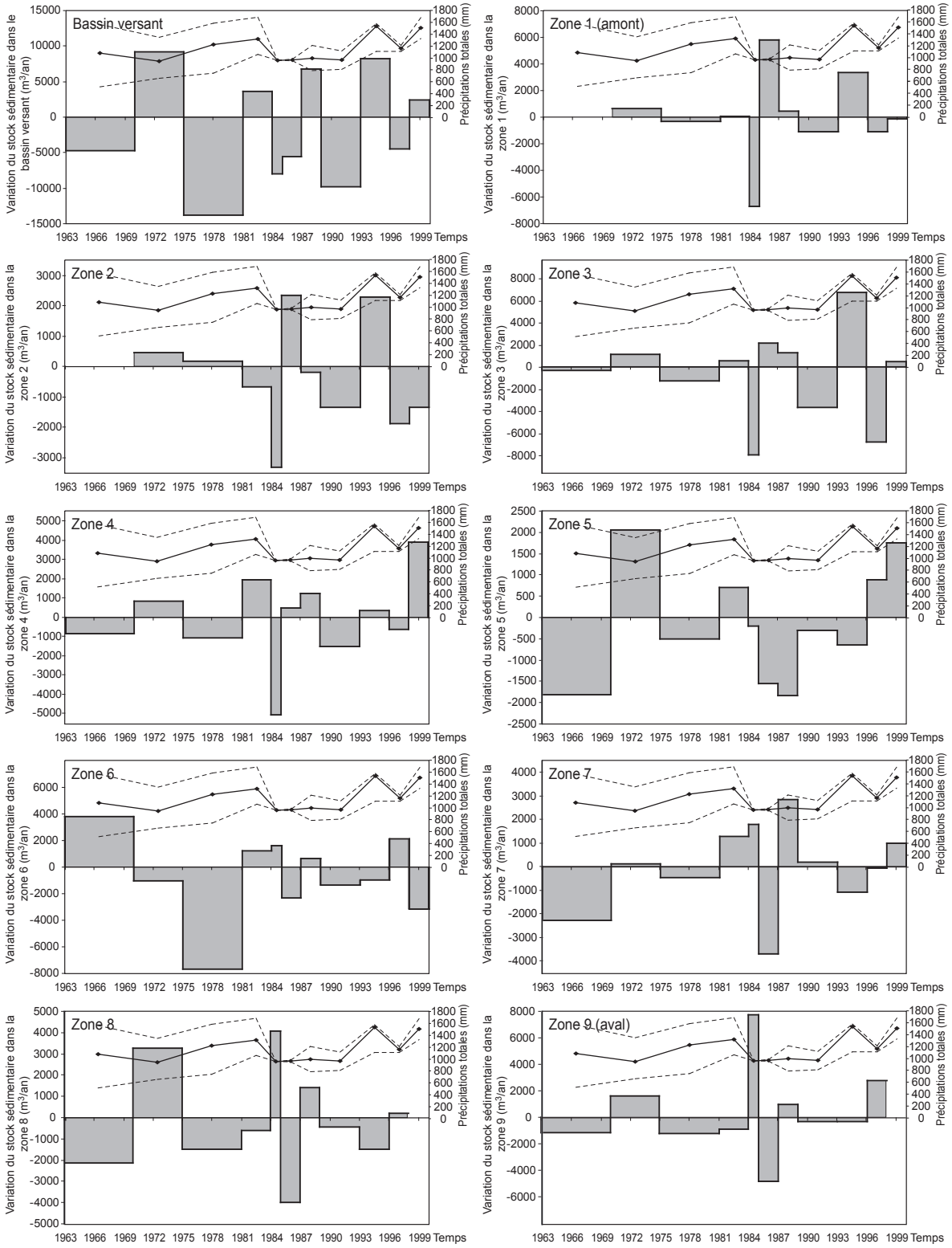


Figure 3-38
Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations totales (neige + pluie) à la station du col de Porte. Le trait plein représente la moyenne de la période, alors que les pointillés indiquent la valeur minimum et maximum

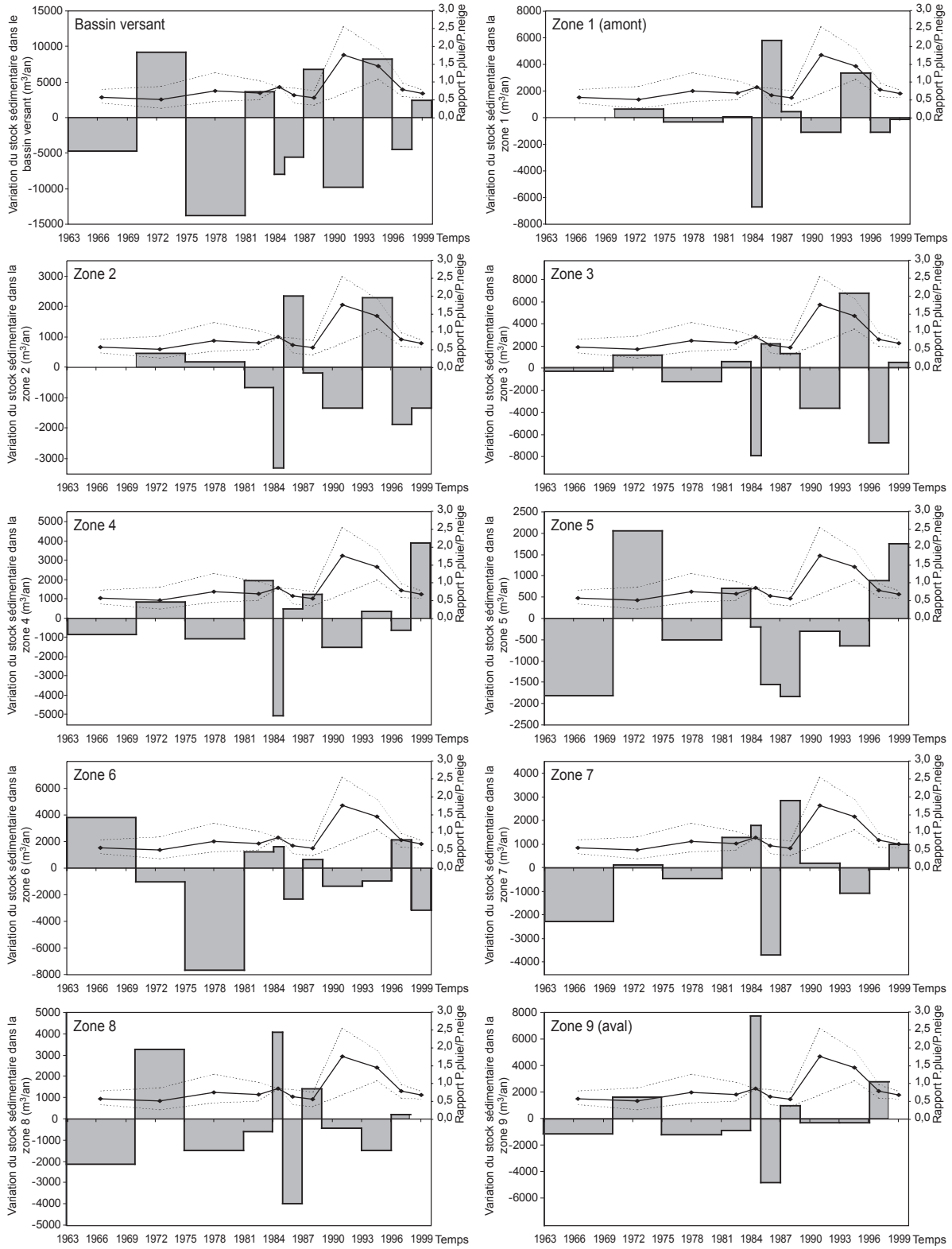


Figure 3-39
Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et le rapport entre les précipitations pluvieuses (mm) sur les précipitations neigeuses (mm) à la station du col de Porte. Le trait plein représente la moyenne de la période, alors que les pointillés indiquent la valeur minimum et maximum

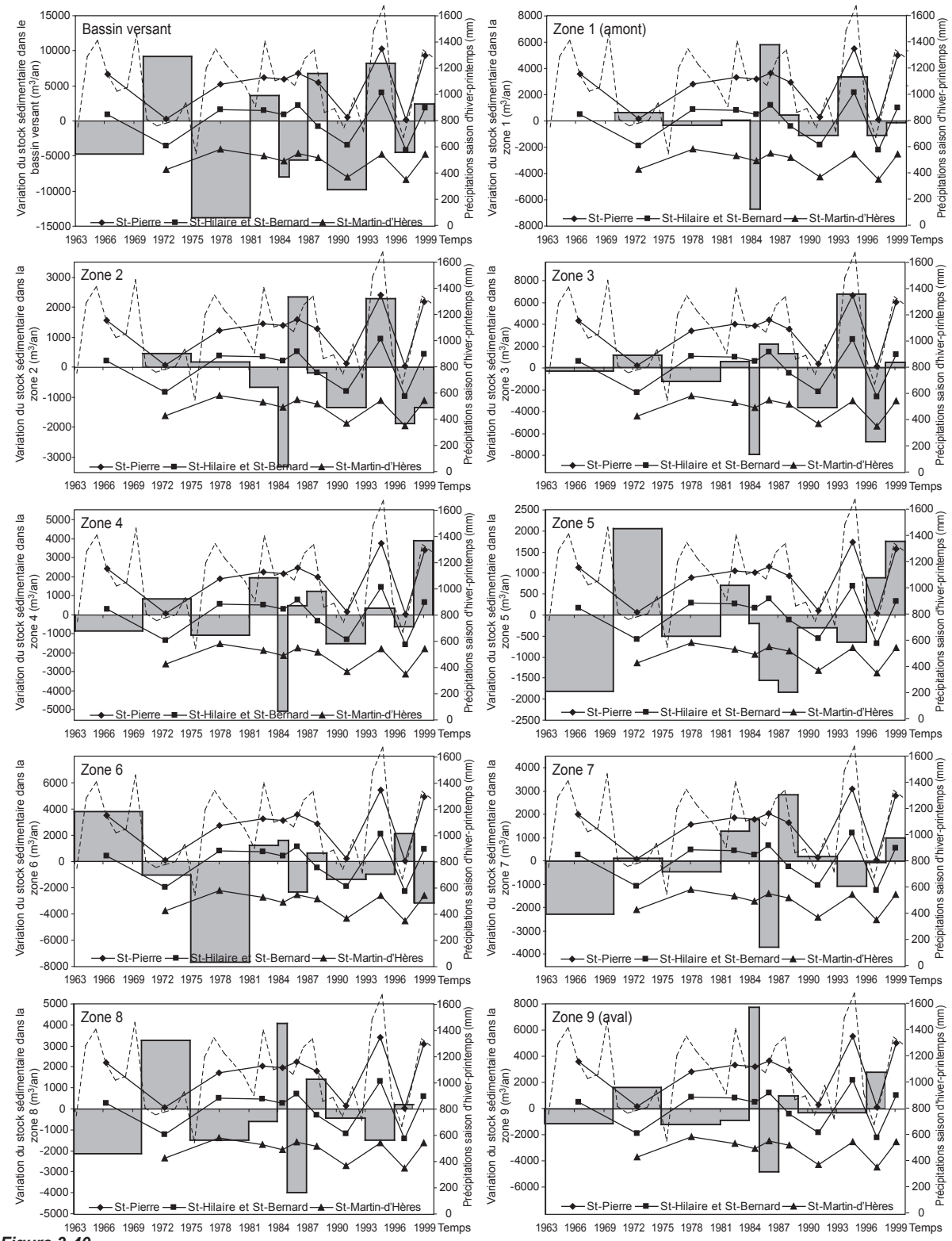


Figure 3-40
Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations de la saison d'hiver et printemps des stations proches du Manival ; en pointillés, les données pour chaque année à la station de St-Pierre-de-Chartreuse

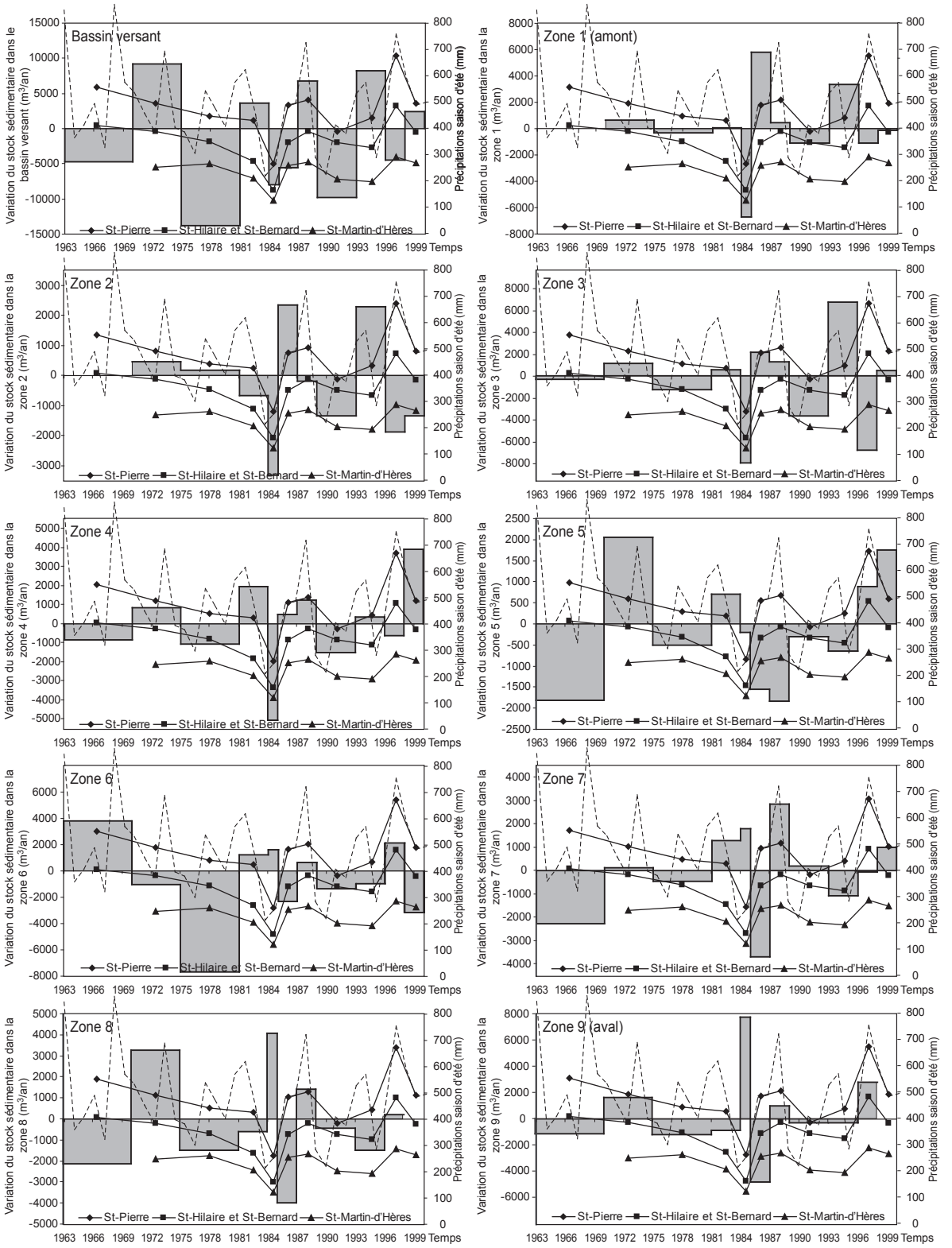


Figure 3-41
Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations durant l'été (juin-juillet-août) des stations proches du Manival ; en pointillés, les données pour chaque année à la station de St-Pierre-de-Chartreuse

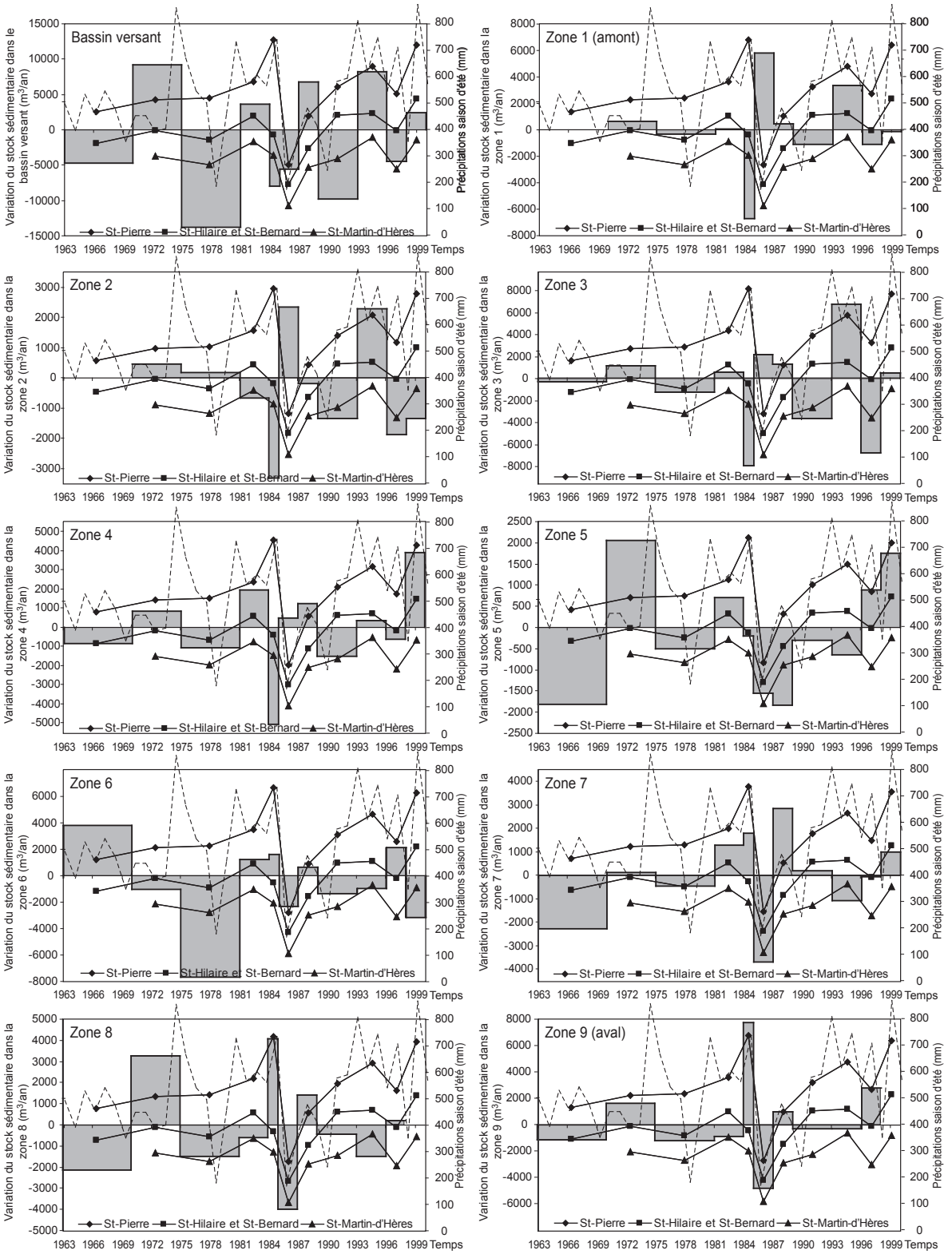


Figure 3-42
Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations durant l'automne (septembre-octobre-novembre) des stations proches du Manival ; en pointillés, les données pour chaque année à la station de St-Pierre-de-Chartreuse

de 1987 pour les moyennes et de 1981 si l'on regarde les valeurs annuelles tracées en pointillés ; avant 1981 une relation semble exister avec un décalage dans le temps. Les courbes de pluies (**Cf. Fig. 3-40**) ont une forme assez proche de celle des précipitations neigeuses du col de Porte (**Cf. Fig. 3-36**), plus que celle des précipitations totales (**Cf. Fig. 3-38**). Les valeurs moyennes d'été et d'automne (**Cf. Fig. 3-41** et **3-42**) ne présentent pas de relation directe avec les volumes de matériaux stockés, mais ces deux courbes, pour chaque saison, ont des tendances complètement opposées. Cela pourrait confirmer les observations faites sur le haut-ravin du Manival (1999-2000). Cependant, en observant les courbes avec toutes les valeurs annuelles, il semble que la relation avec le stock sédimentaire soit relativement bonne, avec toutefois un décalage pour les données d'été. L'année entre 1984 et 1985 montre une baisse du volume de matériaux stocké dans la partie haute du chenal (zone 1 à 4) qui pourrait être liée à la baisse des précipitations d'été, et une augmentation du volume stocké dans la partie basse (zone 6 à 9) ; on peut penser que ces faibles précipitations mensuelles étaient composées principalement de pluies orageuses favorisant les transits des matériaux des parties hautes du talweg vers l'aval. Enfin, la **figure 3-43** utilise les cumuls annuels de précipitation à St-Pierre-de-Chartreuse, station avec des données bien corrélées au Manival (**Cf. Fig. 3-23**) et avec une série complète. On peut observer une bonne relation avec les variations de stock après 1981, en particulier pour le zones amont du chenal ; avant cette date la courbe semble décalée.

Au vu de ces données, les zones amont du chenal semblent plus sensibles aux précipitations, en particulier sous forme de neige. Cela confirme les observations faites lors de l'étude du ravin du Manival (1999-2000) montrant que les zones amont étaient plus réactives, ce qui peut expliquer un certain décalage entre les précipitations et les volumes stockés dans les zones aval. Bien souvent, les données de précipitations semblent mieux ajustées aux volumes après 1981, où les périodes étudiées sont plus courtes, alors qu'avant cette date il existe une sorte de retard dans le temps. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'aucune relation statistique entre les précipitations et les variations de stock sédimentaire du chenal n'est significative et que les interprétations sont à prendre avec une grande réserve ; le système du bassin versant, plus complexe que le sous-système du ravin, comprend trop de processus-relais, à la fois dans le temps et au niveau spatial (amont-aval).

3.2. Transits partiels de sédiments à l'intérieur du chenal : effets des micro-laves torrentielles de forte fréquence

Depuis 1999, aucune lave torrentielle ou autre événement de transport solide de forte intensité n'a eu lieu. Par contre, de nombreux petits mouvements de masse ont contribué à la migration des sédiments. Ces petits événements, présentés sur la **figure 3-44**, participent de façon importante au réajustement géomorphologique interne se produisant au sein du chenal torrentiel.

Sur le terrain, les traces laissées par ces petits événements de transport ne laissent aucun doute : il s'agit d'un processus identique aux laves torrentielles plus importantes, qui laisse sur son passage

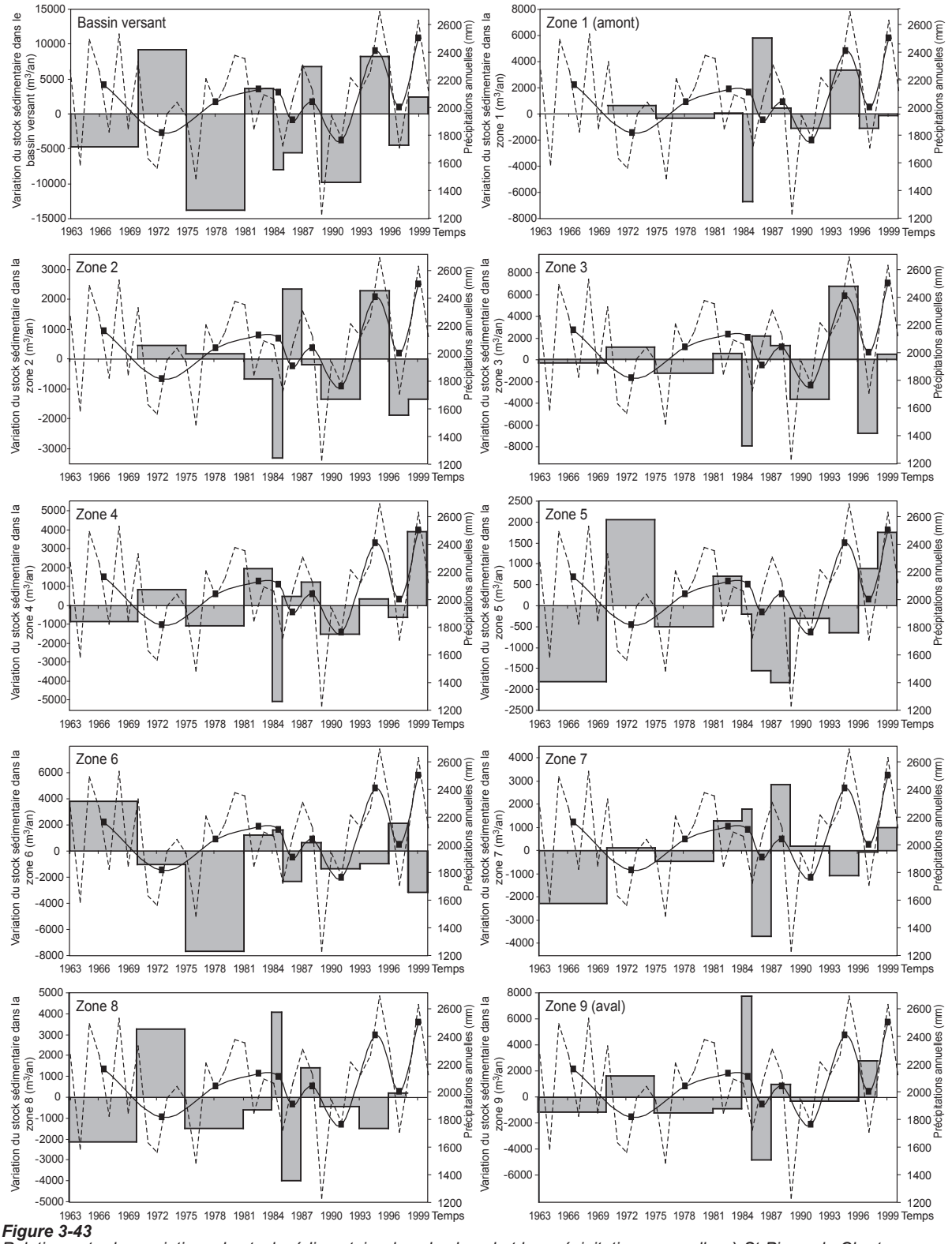


Figure 3-43
Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations annuelles à St-Pierre-de-Chartreuse ; en traits pleins, les moyennes par périodes étudiées, et en pointillés, le cumul annuel

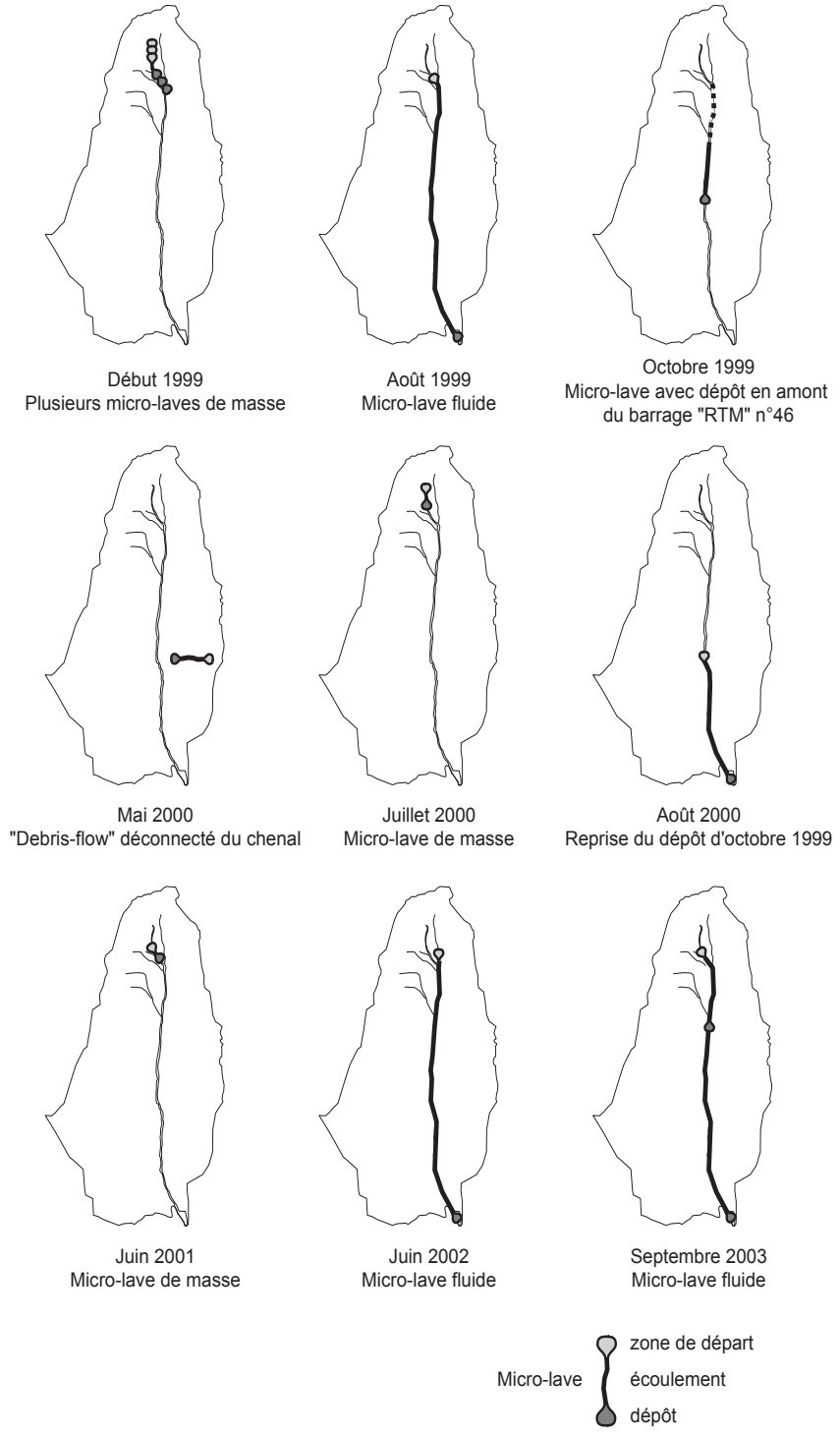


Figure 3-44
Micro-laves torrentielles de faible volume (<1000 m³) et de forte fréquence, observées durant la période d'étude (1999-2003)

traces de boues et bourrelets latéraux caractéristiques, et dans sa zone d'arrêt des formes de dépôt en lobe. Ce sont donc des micro-laves torrentielles ayant des volumes souvent inférieurs à 1 000 m³.

Les expertises de terrain montrent qu'on peut distinguer deux types de micro-laves torrentielles :

- les micro-laves de masse,
- les micro-laves fluides.

3.2.1. Les micro-laves de masse

Les micro-laves de masse sont très semblables à des mouvements de masse. Composées d'une matrice argileuse, bien que les matériaux de surface puissent en être dépourvus sur une épaisseur de parfois plus de vingt centimètres, elles parcourent de faibles distances, de l'ordre de quelques centaines de mètres au maximum. Ce type de micro-lave est fréquent dans la zone amont du chenal, du barrage RTM n°10 jusqu'au delà du barrage RTM n°1 (**Cf. Fig. 1-24**). Cette zone est actuellement fortement chargée puisque neuf barrages RTM, dont certains atteignent une hauteur de 7 mètres, sont complètement ensevelis. Ce secteur est une zone privilégiée d'arrêt des micro-laves provenant du haut du bassin (ravin) qui ont chaque année depuis 1999, formé de nombreux lobes (**Cf. Fig. 3-45**). Ces derniers ont une granulométrie de surface très homogène, caractéristique des laves torrentielles. En 2001 par exemple, entre mi-mai et mi-juin, une micro-lave de masse a prélevé des matériaux juste en amont du barrage RTM n°1 et les a déposés entre les barrages RTM n°1 et n°2, soit un volume d'environ 1 000 m^3 transporté sur une distance d'environ 50 mètres. Les micro-laves de masse ont certainement besoin d'une pente suffisante pour leur déclenchement, ce qui les cantonne dans la partie amont du chenal (**Cf. Fig. 3-44**) ; l'événement de l'automne 1999 ayant déposé un peu moins de 2 000 m^3 en amont du barrage RTM n°46 reste cependant difficile à classer par manque d'informations sur la zone de départ.

3.2.2. Les micro-laves fluides

Les micro-laves fluides sont plus proches des laves torrentielles par le fait qu'elles parcourent de longues distances en laissant de petites levées latérales à l'intérieur du chenal. Trois micro-laves de ce type ont eu lieu depuis 1999 : en Août 1999, début juin 2002, et début septembre 2003. Les zones de départ étaient situées en amont du barrage RTM n°10, dans des zones d'accumulation sédimentaire de la branche principale ou d'un ravin affluent. Ces micro-laves ont parcouru plus de 2 000 mètres avant de s'arrêter dans la plage de dépôt, bien qu'une partie des matériaux transportés puisse être déposée en cours de route comme cela a été le cas par exemple pour la dernière micro-lave, où un dépôt d'environ 500 m^3 s'est formé entre les barrages RTM n°32 et n°31.

3.2.3. Relais et transfert des matériaux dans le chenal : zones de Stockage POtentiel Temporaire de Sédiments (SPOTS)

Comme nous l'avons déjà mentionné dans la première partie, la migration des sédiments est liée à différents processus géomorphologiques de transport qui se relaient et fonctionnent chacun selon leur propre rythme dans le temps. Ce fonctionnement est comparable à différentes échelles d'espace : en amont, les sédiments sont transportés sur les versants et peuvent rester piégés un certain temps au gré de la topographie ou d'un obstacle ; de même, en aval, dans un grand bassin versant, des sédiments sont temporairement stockés dans les plaines d'inondation par exemple. Dans cet emboîtement d'échelles, le chenal torrentiel constitue un maillon essentiel pour les petits bassins versants montagnards où des matériaux sont temporairement stockés dans certains biefs du chenal.

Il existe au sein du chenal des zones de Stockage POtentiel Temporaire de Sédiments (SPOTS) privilégiées. La concomitance entre les apports de versant de grande ampleur et les événements de transport torrentiels est rare dans ce type de bassin versant. Le chenal du Manival est stabilisé par les ouvrages "RTM" et les apports sédimentaires des berges sont donc limités. Les écroulements peuvent apporter de grandes quantités de matériaux au chenal mais généralement, ils ne se transforment pas instantanément en lave torrentielle contrairement aux glissements de terrain qui suivent fréquemment ce mode de fonctionnement. Les matériaux de la lave torrentielle seront donc repris essentiellement dans le chenal. Sur l'ensemble de son linéaire, les matériaux qui remplissent les zones de SPOTS sont acheminés en masse vers l'aval par les processus de transport torrentiel les plus efficaces : les laves torrentielles. Le dépôt d'une lave torrentielle conséquente peut constituer et remplir une zone de SPOTS du chenal en une seule fois. Toutefois, les micro-laves, bien que d'un volume moindre, ont une fréquence plus élevée qui permet également de remplir de manière plus régulière et souvent plus rapide ces zones d'accumulation privilégiée (SPOTS). Ces dernières peuvent donc être considérées comme des zones-clés dans l'apport des sédiments à l'exutoire du bassin versant, dans le sens où les matériaux stockés vont être la source principale du transport sédimentaire par lave torrentielle. A l'inverse, lorsque ce type de zone est purgé, il peut accueillir une grande quantité de matériaux et éventuellement stopper temporairement le transit sédimentaire.

Sur le chenal du Manival, il est possible de déterminer plusieurs zones de SPOTS. L'observation depuis 1999 de la zone n°1, où sont implantés les barrages RTM n°1 à 10, montre un important remplissage suite à une accumulation de micro-laves torrentielles (**Cf. Fig. 3-45**) ; alors que les mesures sur les photographies aériennes du chenal indiquent également un important remplissage de la zone n°3 en 1996, en amont du barrage RTM n°30. L'étude diachronique de l'état de remplissage du torrent du Manival a permis de déterminer les zones aux amplitudes spécifiques les plus fortes (**Cf. Fig. 3-9**) : les zones n°1, n°3, n°6 et n°9 ont des capacités de remplissage supérieures aux autres zones, de l'ordre de 4 à 6 mètres d'épaisseur en moyenne. Quant à la zone n°9, correspondant à la plage de dépôt, il est tout à fait logique qu'elle soit une zone privilégiée de stockage. De nombreuses études confirment ce type de fonctionnement, où la production des sédiments, le transport et l'accumulation sont expliqués selon les concepts de la systémique [Tricart, 1960 ; Engelen et Venneker, 1988 ; Marutani *et al.*, 1999 ; Marutani *et al.*, 2001 ; Betts *et al.*, 2003].

3.3. Rôle primordial de la pente dans le fonctionnement sédimentaire

Ce dernier paragraphe constitue une synthèse qui, à partir de l'étude de la dynamique sédimentaire du torrent du Manival, cherche à mettre en place la procédure de travail pour estimer sur d'autres torrents, le volume d'une lave torrentielle. Afin d'effectuer une modélisation, il faut déterminer des indicateurs qui puissent expliquer le fonctionnement torrentiel, au moins dans ses grandes lignes ; l'idéal étant de réduire au maximum le nombre d'indicateurs utilisés.

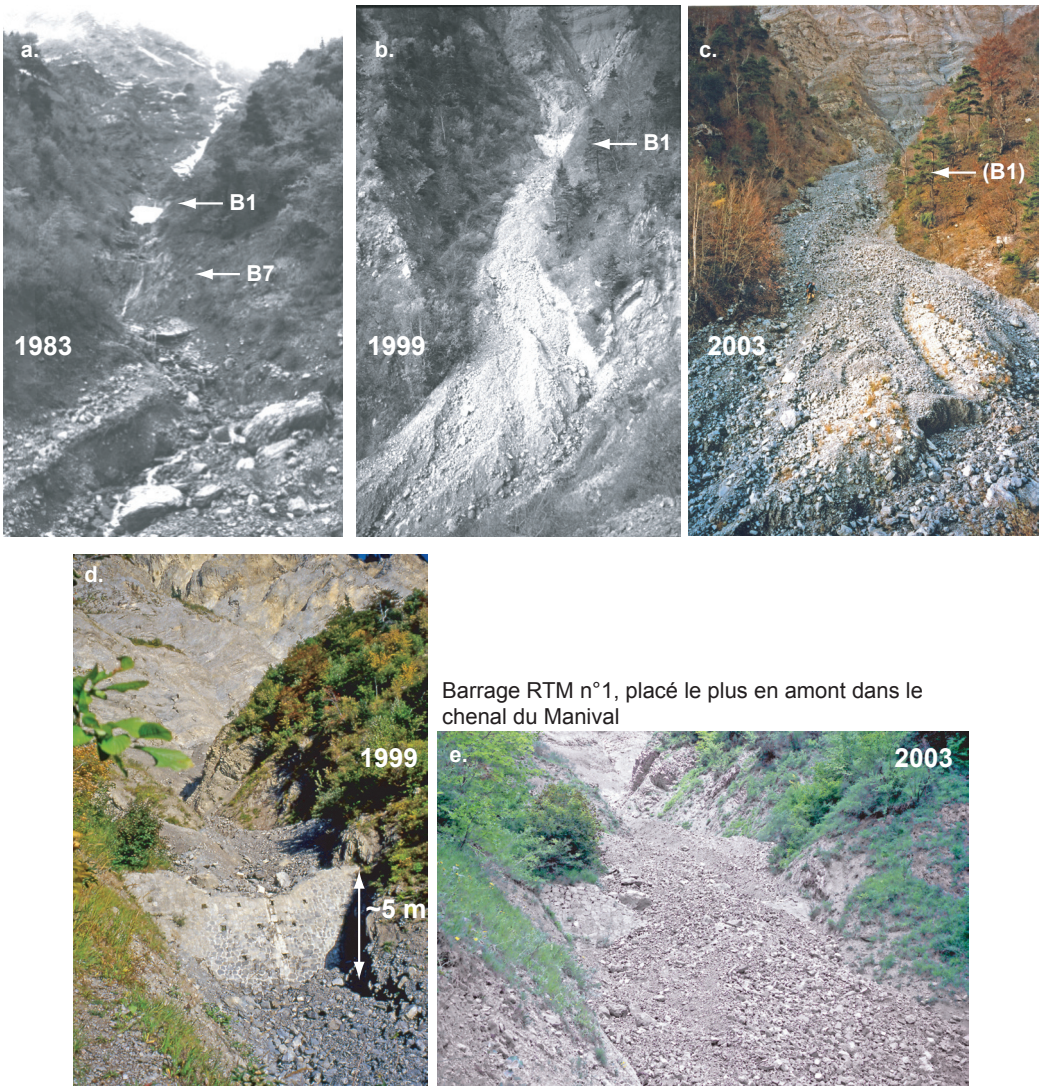


Figure 3-45
La zone de SPOTS du chenal entre le barrage RTM n°1 et 10 a une forte pente de plus de 20° mais permet pourtant une forte capacité de stockage des matériaux. Les barrages n°1 et 7 (B1 et B7) ont une hauteur totale de 7 m (Clichés RTM38 et S.V-C.)

L'étude menée sur le bassin versant du Manival confirme les hypothèses, les concepts et les observations faites sur le fonctionnement de la dynamique sédimentaire de ce type de torrent. Certains paramètres, en particulier la pente forte du torrent ou une proportion considérable d'argile (de 15 à 45%) dans les sédiments transportés, sont déterminants pour la formation de laves torrentielles ; mais le point clé essentiel qui permet d'expliquer la dynamique du transport, est la reprise de matériaux, principalement accumulés dans certaines parties du chenal. Ces zones préférentielles de SPOTS du chenal existent lors d'un affaiblissement de la pente et/ou d'un élargissement du chenal. Cet élargissement est fréquent sur les zones de SPOTS artificielles (plages de dépôt) mais beaucoup plus rare dans le chenal naturel ; cependant, un élargissement est en principe accompagné d'une réduction de la pente. On constate donc que la pente est le principal moteur du transport solide torrentiel. Ce constat peut paraître simpliste, d'autant qu'il parait évident à n'importe quel ouvrier travaillant sur ce terrain, mais la pente constitue l'indicateur principal à utiliser puisqu'elle permet à elle seule d'expliquer la plus grande partie du fonctionnement torrentiel.

3.3.1. Localisation des zones de Stockage POtentiel Temporaire de Sédiments (SPOTS) dans le chenal

Comme nous venons de le voir, les zones de SPOTS jouent un rôle primordial dans le fonctionnement de la dynamique sédimentaire. L'étude du bassin du Manival, avec une base de données importante sur de nombreuses dates passées, nous a permis de localiser les zones ayant les plus fortes amplitudes de stockage sédimentaire potentiel (**Cf. Fig. 3-9**). Mais comment effectuer un tel diagnostic sur un autre torrent, présentant moins de données disponibles, en se fondant sur la méthode d'estimation des volumes que nous proposons ?

Les observations de terrain ont montré que le dépôt des matériaux est principalement lié à la pente. Un élargissement ou un changement brusque de direction du chenal sont des éléments favorables, mais généralement la pente s'adapte à ces conditions. Cette dernière est une variable très intégratrice et suffisante pour localiser les zones de stockage temporaires. La difficulté réside dans le fait qu'il ne s'agit pas de prendre la valeur absolue de la pente, mais plutôt la rupture de pente, c'est-à-dire la variation de l'inclinaison de la pente d'une zone du chenal par rapport à celle de la zone située en amont. Ainsi la zone n°1, bien qu'ayant une forte pente de l'ordre de 20°, est une zone de dépôt car le ravin situé juste en amont a une pente moyenne bien supérieure de l'ordre de 30°.

La localisation de manière objective de ces ruptures de pentes s'est avérée être une opération délicate. En effet, il existe un problème dans le choix de l'échelle car les zones de SPOTS ne correspondent pas aux casiers (biefs) mesurés qui ont une longueur inférieure à 50 mètres, mais sont plus grandes, jusqu'à quelques centaines de mètres. Ainsi un calcul des ruptures de pente par bief ne met pas en évidence les zones de stockage temporaires. Il semblerait même que la distance adéquate soit variable, avec une longueur plus élevée à l'aval (pente plus faible) qu'à l'amont (pente plus forte). D'un autre côté, le graphique du profil en long du chenal torrentiel est assez peu lisible et ne permet pas de déterminer facilement les ruptures de pente. C'est pourquoi nous avons utilisé, non pas les altitudes du profil en long, mais les résidus altitudinaux avec un profil en long moyen. Ce dernier a été calculé à partir du profil en long en établissant une courbe de tendance d'ordre 2 (de la forme $y = ax^2 + bx + c$) par la méthode des moindres carrés. Les résidus étudiés ne sont autres que les différences d'altitudes entre les deux profils en long (profil en long du chenal et profil en long moyen) sur l'ensemble du linéaire. Le graphique ainsi constitué (**Cf. Fig. 3-46**) se lit de l'amont vers l'aval et révèle mieux les ruptures de pente les plus marquées, situées en amont des zones de SPOTS du chenal.

Nous ne disposons pas actuellement d'éléments suffisants pour pousser plus avant l'utilisation des zones de SPOTS du chenal de manière quantitative. Les zones de SPOTS se sont révélées assez difficiles à localiser précisément (en particulier la longueur de la zone), toutefois elles ont un rôle essentiel dans le déclenchement et le développement des laves torrentielles, donc plus largement dans le fonctionnement sédimentaire et le risque torrentiel. Le remplissage des zones de SPOTS rapproche le torrent de son seuil d'instabilité intrinsèque et augmente alors le risque de déclenchement d'une lave

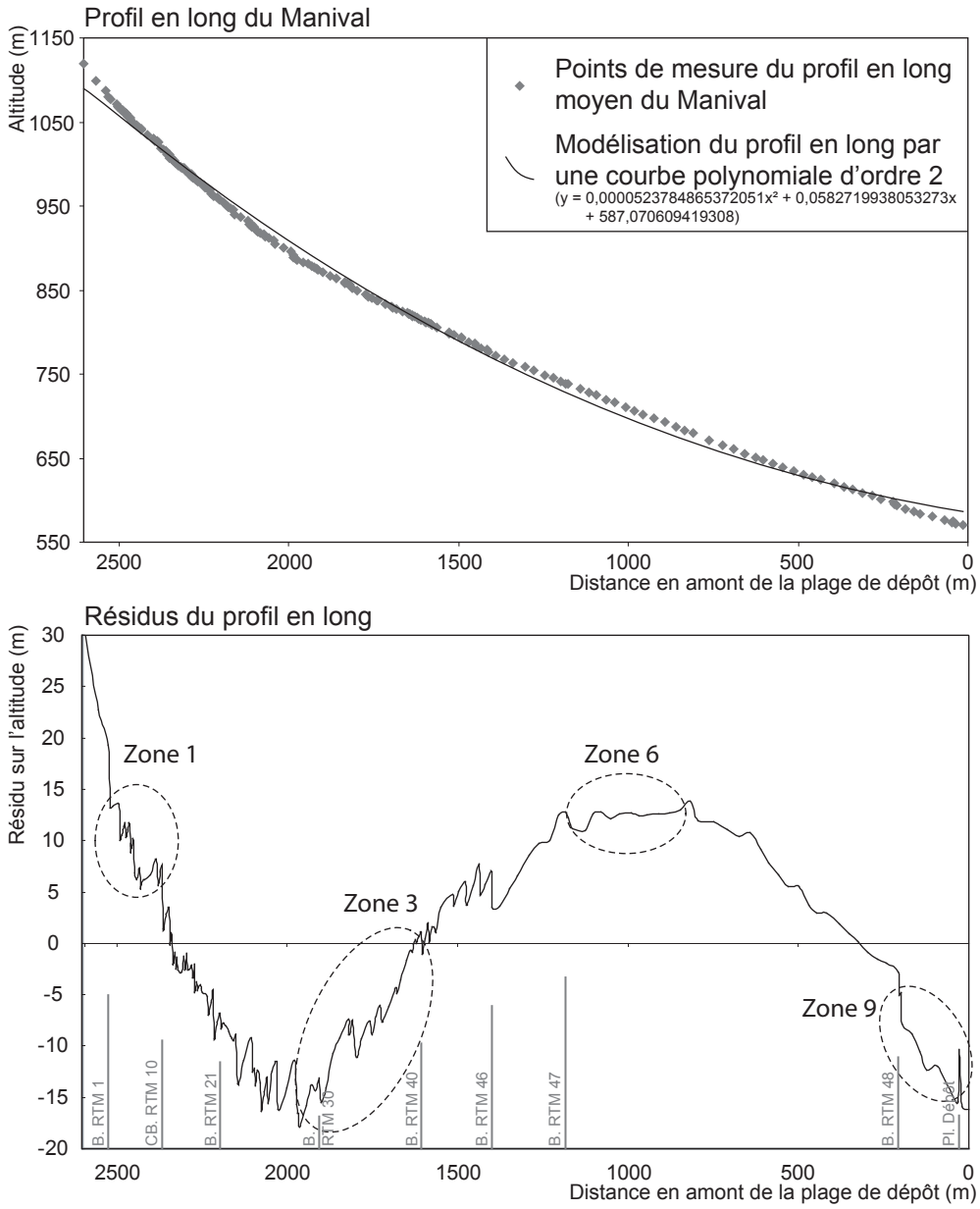


Figure 3-46
Localisation des zones de SPOTS du chenal du Manival à l'aide de l'étude des résidus (différences) d'altitude du profil en long de 1993 ; en grisé, quelques barrages (et un contre-barrage) RTM caractéristiques

torrentielle, y compris en cas d'événement hydrométéorologique d'intensité modéré. Par ailleurs, il accroît le risque de production d'une lave majeure, au cas où surviendrait un événement hydrométéorologique de fréquence rare. L'état de remplissage des zones de SPOTS est donc un indicateur (qualitatif) du risque : lorsque les zones de SPOTS sont remplies, le risque est élevé alors que lorsque les zones de SPOTS sont vides, le risque est faible puisque chaque zone de SPOTS peut potentiellement contribuer à contenir la lave et à la stopper. Plus concrètement sur le terrain, le parcours pédestre du chenal permet de se rendre compte rapidement de l'état de remplissage de l'ensemble du chenal, dont les zones de SPOTS : un fort remplissage permet le plus souvent une évolution rapide et aisée jusque dans les ravins de tête de bassin, alors qu'un lit récemment curé entraîne un déplacement beaucoup plus lent et difficile avec des franchissements de seuils délicats ne permettant pas toujours d'accéder aux parties les plus amont du chenal.

3.3.2. PREdiction des Volumes de l'EvéNement Torrentiel (PREVENT) en utilisant les biefs ayant une pente supérieure à 8°

L'objectif final de notre travail a été d'estimer le volume des apports sédimentaires torrentiels, élément essentiel pour les gestionnaires des risques. L'étude détaillée de la dynamique sédimentaire du bassin du Manival nous a permis d'appréhender au mieux le fonctionnement des torrents où les dépôts et reprises de matériaux dans le chenal (processus-relais) sont le moteur principal par l'intermédiaire des laves torrentielles. Nous avons vu également que les matériaux potentiellement mobilisables sur l'ensemble du chenal ne pouvait pas être totalement transportés par une seule lave torrentielle. En effet, pour le torrent du Manival, le volume potentiel de sédiments disponibles dans le chenal sur tout son linéaire est élevé (**Cf. Fig. 3-1**), de l'ordre de 100 000 m^3. Les expertises de terrain sur ce bassin, les données historiques (**Cf. Tab. 1-11**), et la connaissance empirique du personnel du service de la RTM, laissent penser que ce volume potentiel surestime le volume maximum de matériaux transportables par un événement torrentiel, qui serait plutôt de l'ordre de 50 000 à 70 000 m^3. Il est donc possible que les sédiments disponibles dans le chenal ne soient pas repris dans leur intégralité.

Dans la littérature spécialisée, la valeur de pente de 3° (environ 5%) est communément admise comme étant un seuil pour le dépôt des laves torrentielles [Takahashi, 1981 ; Rickenmann, 1997 ; Ancey, 1999], c'est-à-dire qu'en dessous de 3° la lave va systématiquement s'arrêter (ce qui n'est pas le cas des lahars). Mais divers auteurs ont également observé un ralentissement, voire un arrêt du front pour des valeurs de pentes allant jusqu'à 8 à 10° (15 à 17%) [PWRI, 1984 ; Rickenmann, 1997 ; Brochot *et al.*, 2000b] Brochot--> p.137). Dans ces conditions, on peut considérer que la lave torrentielle a perdu son pouvoir érosif puisque le ralentissement ou l'arrêt reflète une baisse importante de sa puissance et de son énergie ; elle ne pourra pas alors reprendre et entraîner de nouveaux matériaux du chenal mais seulement continuer à transporter les sédiments déjà repris plus en amont. Nous avons donc décidé de ne prendre en compte que le matériel détritique de la partie amont du chenal, où les pentes sont supérieures à 8°, pour estimer le volume de matériaux de la plus grosse lave torrentielle possible qui pourrait survenir.

Ainsi, la méthode de calcul de PREVENT pour le torrent du Manival a consisté à faire la somme des volumes potentiels de sédiments stockés dans tous les biefs du chenal en amont du barrage RTM n°47, où les pentes sont supérieures à 8°. Le volume maximum de sédiments pouvant être transporté par un événement torrentiel calculé par la méthode de PREVENT, est présenté dans le **tableau 3-7** pour chaque date étudiée. En moyenne sur l'ensemble de la période d'étude (1963-2000), ce volume est de l'ordre de 50 000 m^3 avec un maximum en 1996 atteignant environ 66 000 m^3 (78 000 m^3 pour l'hypothèse maximaliste). La valeur minimum d'environ 30 000 m^3 en 1993 montre que la recharge du chenal peut-être assez rapide et qu'un suivi régulier est nécessaire. Au regard des deux hypothèses, maximaliste et minimaliste (en fonction des PLAN inf. et PLAN sup.), la valeur médiane est entachée

Tableau 3-7
Volume potentiel total de sédiments stockés dans le chenal du Manival. Calculs de la méthode de PREVENT ne prenant en compte que la partie supérieure du chenal ayant une pente de plus de 8° (amont du barrage RTM n°47)

Date	Volume en amont du barrage RTM n°47 (Pente du chenal supérieur à 8°)		
	Hyp.minimaliste (PLAN sup.)	Hyp.maximaliste (PLAN inf.)	Médiane
1963	44 401	64 866	54 633
1970	27 788	52 387	40 087
1975	48 630	78 279	63 454
1981	34 222	60 591	47 406
1984	43 690	68 512	56 101
1985	25 580	45 318	35 449
1987	38 959	63 938	51 449
1989	41 597	65 778	53 688
1993	18 993	42 144	30 568
1996	53 750	78 407	66 079
1998	34 985	59 514	47 250
2000	41 730	68 791	55 260
Moyenne	37 860	62 377	50 119

d'une erreur globale moyenne de plus ou moins 24% sur le volume prédit, avec un minimum de 19% (en 1963 ou 1996) et un maximum de 38% (en 1993). Cette erreur inclut les incertitudes des mesures photogrammétriques effectuées sur les photographies d'archives estimées à environ 6% du volume [Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005]. Les résultats du **tableau 3-7** sont tout à fait en accord avec les observations faites sur le torrent du Manival, en particulier l'événement le plus volumineux de 60 000 m^3 en 1968, certainement un peu surestimé (mélange avalanche de fonte et lave torrentielle).

Dans cette troisième partie, l'étude détaillée du torrent du Manival nous a permis de comprendre la dynamique sédimentaire de ce type de bassin versant torrentiel. Les principales zones sources de sédiments apportés au chenal ont été localisées grâce à une cartographie fonctionnelle, relativement simple et rapide à élaborer. Le suivi du haut-ravin du Manival (1999-2000) a montré que ce sous-système était plus réactif que le chenal à l'aval. Il a permis de mieux comprendre le fonctionnement de l'ensemble du chenal et des interactions entre le transport solide et les conditions hydrométéorologiques. Les états de remplissage en matériaux mobilisables effectués à différentes dates (1963-2000) montrant les variations de stock dans le chenal, ont été utilisés pour l'élaboration de bilans sédimentaires. Le rôle des facteurs hydrométéorologiques sur la dynamique sédimentaire n'a pas pu être quantifié. Mais deux indices liés à la pente du chenal ont finalement été déterminés afin de modéliser la dynamique sédimentaire du torrent et de pouvoir estimer le volume d'une lave torrentielle, informations indispensables pour les gestionnaires des risques torrentiels :

- Etat des zones de SPOTS (Stockage POtentiel Temporaire de Sédiments) du chenal, indice qualitatif informant sur le risque de lave torrentielle,

- PREVENT (PRédiction du Volume de l'Evénement Torrentiel), indice quantitatif estimant le volume maximal que pourrait apporter la lave torrentielle majeure à venir.

Ces deux indices dérivés du rôle prédominant de la pente, et en particulier la méthode de PREVENT qui permet de quantifier le volume, vont maintenant être estimés sur d'autres torrents. Ainsi nous espérons prévoir le volume d'une lave extrême qui pourrait survenir sur un torrent sans que celui-ci n'ait été étudié en détail au préalable.

QUATRIEME PARTIE
Application de la méthode de PREVENT

1. Choix de deux torrents du même type que le Manival : le Merdarêt et les Arches
2. Application de la méthode de PREVENT
3. Etude diachronique des événements contemporains sur les torrents étudiés
4. Critique et perspective de la méthode de PREVENT

Grâce à l'étude détaillée du bassin versant du Manival, nous avons élaboré une méthode de PREdiction du Volume de l'EvéNement Torrentiel (PREVENT) pour estimer les volumes maximum de matériaux que pouvait apporter une lave torrentielle. Cette quatrième partie présente l'application de cette méthode à deux autres bassins versants du même type que celui du Manival, pour voir si elle peut être utilisée avec un certain succès sur des torrents n'ayant pas été étudiés de manière approfondie.

1. Choix de deux torrents du même type que le Manival : le Merdarêt et les Arches

1.1. Critères de sélection des bassins versants

1.1.1. Critères liés à la méthode

Les critères retenus dans le choix des bassins versants sont de deux ordres : ceux liés au domaine d'application actuel de la méthode et qui se réfèrent principalement aux caractéristiques du bassin versant du Manival, et ceux liés à la disponibilité d'informations complémentaires nécessaire à la validation des résultats.

En se référant à la typologie de Richard [1996], basée sur quatre situations différentes génératrices de laves torrentielles, le torrent du Manival se situerait dans le second type où les laves sont formées dans le bassin de réception avec des matériaux d'origine localisée: éboulis, dérochoir, éboulement d'abrupt. Ce type de bassin est aussi plus communément appelé par le service de la RTM "torrent à clappes". Cette typologie traduit le fonctionnement du transit sédimentaire, élément primordial pour estimer les volumes maximum qui pourraient être transportés lors d'une crue. Le type "torrent à clappes" est fortement lié à la nature lithologique et géologique du bassin versant. Ainsi nous avons tenté de rester proches des caractéristiques du bassin du Manival : des formations rocheuses plissées et fracturées allant de couches calcaires à marneuses avec de fréquentes alternances entre roches dures et roches plus tendres.

Comme cela a été exposé dans la première partie, les torrents peuvent être classés en deux grands groupes (**Cf. Fig. 1-17**) ; la méthode développée ne s'applique qu'à l'un de ces deux types. La fourniture sédimentaire doit donc constituer un seuil intrinsèque afin de rester dans le domaine de validité de la méthode, et les bassins versants ayant un stock sédimentaire quasiment illimité (constitué d'héritages glaciaires par exemple) sont exclus du domaine de test de la méthode. Pour rester proches des conditions du torrent du Manival, les torrents soumis à de grands glissements de terrain ont été évités, et les deux bassins versants se situent dans des conditions de moyenne montagne, également dans le département de l'Isère.

1.1.2. Critères liés aux informations disponibles nécessaires à la validation de la méthode

Afin de pouvoir valider les résultats sur ces deux nouveaux torrents, il a été nécessaire d'obtenir un maximum d'informations. Comme pour le torrent du Manival, ces informations proviennent de deux sources essentielles : les archives du service de la RTM et les photographies aériennes (centralisées par l'IGN).

Les archives du service de la RTM doivent être suffisamment abondantes pour permettre de retracer, à partir des *fiches événements*, l'historique des crues et des laves torrentielles. Les techniciens décrivent l'événement (zones sources, zones de dépôts, dégâts,…) et généralement estiment sur le terrain le volume de matériaux déposé. Une estimation des volumes peut également être faite lors du curage des matériaux, en particulier dans les plages de dépôt. La date précise de l'événement est importante pour l'utilisation éventuelle de données hydrométéorologiques, et pour choisir judicieusement les photographies aériennes en fonction de la date de leur prise de vue. Les documents du service de la RTM peuvent aussi fournir des renseignements sur les aménagements : dates de construction ou de modification, dimension, altitude des ouvrages, qui permettent de caler et ainsi de calculer le niveau de référence (PLAN sup. ou PLAN inf.).

Pour notre étude, il était nécessaire d'obtenir des photographies aériennes afin d'effectuer une étude diachronique. Le choix a été essentiellement fonction de la date des événements et, bien entendu, de la disponibilité des photographies en terme de couverture du bassin versant, d'échelle globale, et d'accessibilité aux clichés. Ces renseignements ont été pris auprès du service de photographie et cartographie de l'IGN.

Finalement, en fonction de tous ces critères, et sans négliger l'accès au chenal puisque nous avons également fait des mesures topographiques de terrain, deux bassins versants torrentiels ont été retenus : le Merdarêt, près du col d'Ornon, et les Arches, au sud du Mont-Aiguille.

1.2. Présentation des bassins versants

Les bassins versants torrentiels des Arches et du Merdarêt sont tous deux situés dans le sud du département de l'Isère (**Cf. Fig. 4-1**). Dans ce paragraphe, nous allons successivement les décrire.

1.2.1. Caractéristiques générales du bassin versant du Merdarêt.

A. Situation

Le torrent du Merdarêt se situe dans la série domaniale de Chantelouve, gérée par le service de la RTM, dans le canton du Valbonnais à une soixantaine de kilomètres au sud-est de Grenoble. A proximité du col d'Ornon, qui permet de relier Entraigues dans le Valbonnais au Bourg-d'Oisans dans la vallée de la Romanche, il fait partie d'un complexe de cinq torrents, qui ont érodé un versant exposé à l'ouest,

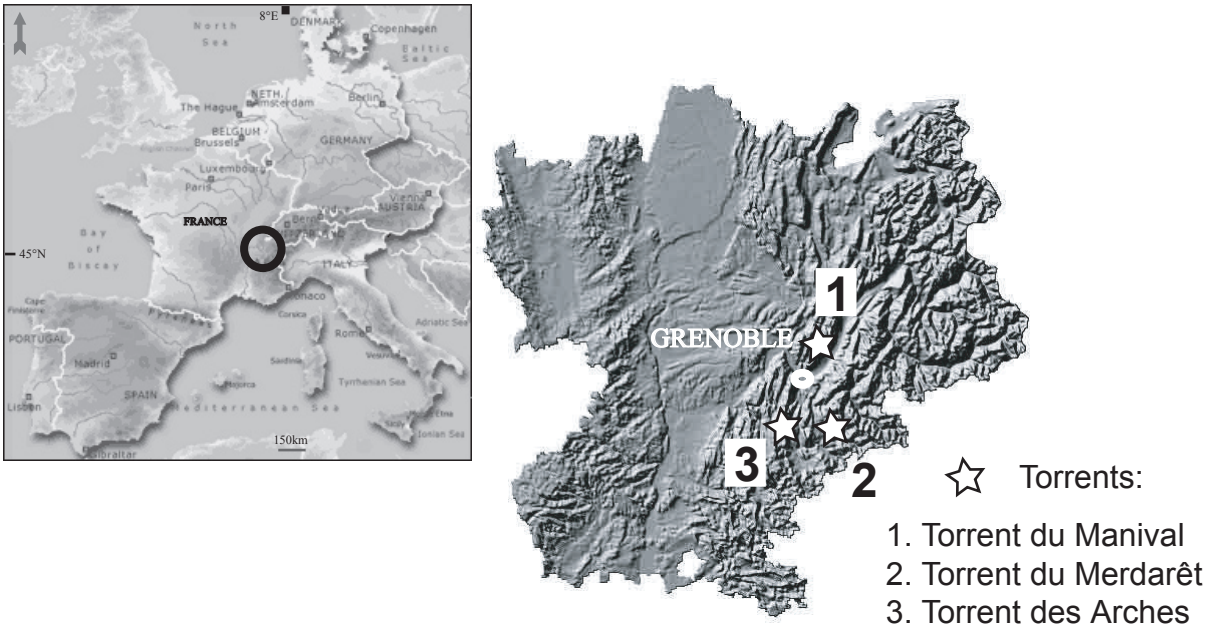


Figure 4-1
Situation des torrents en Isère (Alpes-du-Nord, France)

composé de roches peu cohésives (calcaires et schistes). Les écoulements de ces torrents se regroupent dans le cours d'eau de la Malsanne, affluent de la Bonne faisant partie du cours moyen du Drac.

B. Morphologie générale

Le bassin versant du "Grand Merdarêt" à sa confluence avec la Malsanne, vers 1080 mètres d'altitude, a une surface d'environ 4 km². L'altitude moyenne d'après la courbe hypsométrique est de 1645 mètres, et 75% de sa surface est située au dessus de 1360 mètres. Le bassin que nous avons étudié se limite à la partie amont à la plage de dépôt, vers 1322 mètres d'altitude, à proximité de la route départementale. Le talweg principal prend naissance à environ 1900 mètres d'altitude et rejoint le cône de déjection au niveau d'une seconde plage de dépôt à 1545 mètres d'altitude, après un passage en gorge (**Cf. Fig. 4-2**). Si l'on se réfère aux trois zones classiques du bassin versant torrentiel (**Cf. Fig. 1-1**), le chenal d'écoulement est quasiment inexistant. Dans le bassin de réception, le ravin principal s'oriente vers la Tête des Filons culminant à un peu moins de 2400 mètres d'altitude, alors que trois ravins en rive gauche drainent toute la partie orientale sous le sommet des Pâles (2435 mètres d'altitude). Au niveau de la gorge, un réseau de ravins (en rive droite) et de ravines draine le reste du bassin de réception. Historiquement, il est arrivé que l'écoulement sur le cône de déjection se soit déversé en rive gauche suivant la pente, se confondant ainsi avec celui du torrent voisin, les Pâles ; les deux torrents réunis ont alors causé des dégâts jusque dans les habitations des hameaux les plus proches.

C. Géologie et lithologie

Les vallées de la Malsanne (Chantelouve) et de la Lignarre (Ornon) représentent les deux tronçons successifs d'une dépression Nord-Sud, en forme de sillon, qui longe le chaînon du Taillefer du côté oriental et qui culmine au col d'Ornon. L'origine géologique de cette dépression correspond à l'évidement

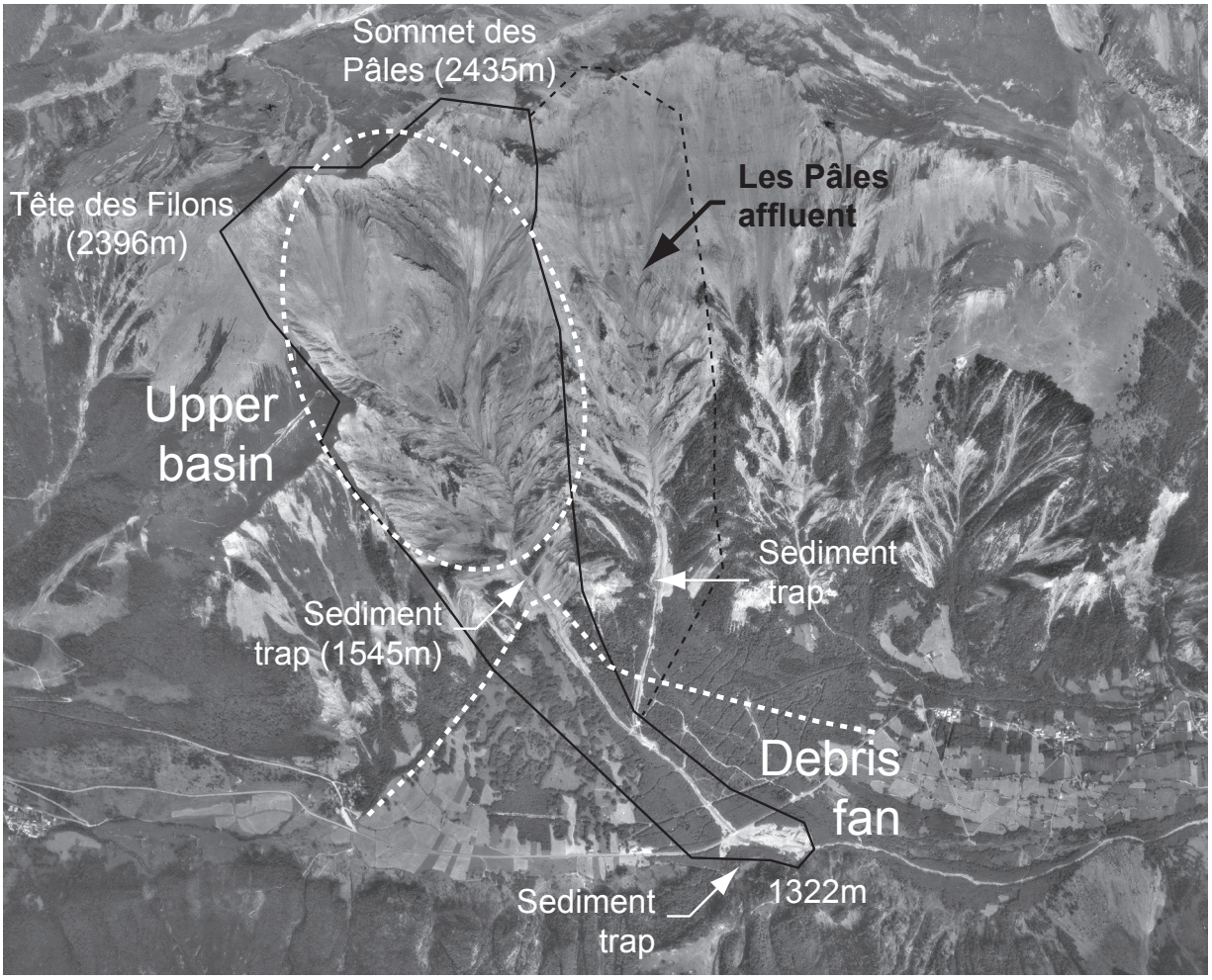


Figure 4-2
Le bassin versant du Merdarêt (photographie aérienne de 2000, mission F3335-3536 environ au 1/30 000e)

par l'érosion quaternaire d'un fossé effondré créé, lors de la sédimentation jurassique, par le jeu de la "faille du col d'Ornon" [Gidon, 2004]. La **figure 4-3** permet de distinguer quatre grands ensembles, dont les deux premiers concernent directement le bassin versant du Merdarêt :

- la vallée de Chantelouve, sillonnée par la Malsanne et ses principaux affluents, qui est occupée par des cônes de déjection récents,
- le contrefort du Grand Renaud à l'Est de la vallée, qui est constitué de calcaires et schistes ardoisiers du Lias dans lesquels les bassins de réception torrentiels sont le siège d'une érosion active,
- la chaîne montagneuse à l'Ouest dont fait partie le massif du Taillefer, qui est formée de schistes phylliteux cristallins relativement massifs.
- la partie la plus haute du bassin de la Malsanne, autour du lac du Vallon, qui constitue une barrière orientale de nature granitique.

La série stratigraphique précise des roches affleurantes du bassin versant du Merdarêt, de l'amont à l'aval, se présente de la façon suivante (carte géologique détaillée de la France au 1/50 000- Feuille XXXIII-35 de Vizille, 1972) :

- Carixien et Lotharingien (ressaut calcaire avec des niveaux schisteux dans le Carixien)
- Domérien (calcaires marneux roux)
- Toarcien (calcaires marneux et marnes)
- Terrains sédimentaires, cône de déjection stabilisé.

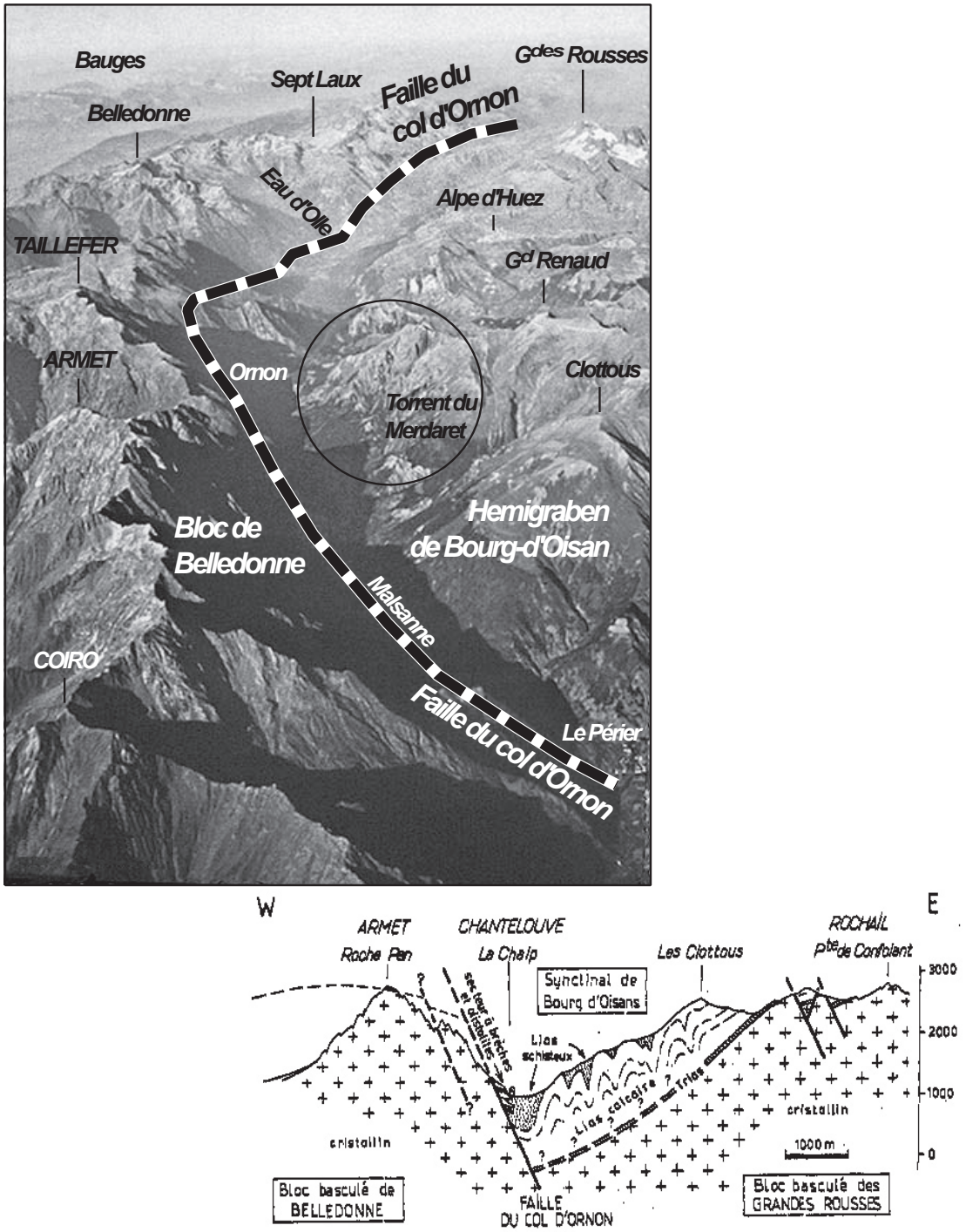


Figure 4-3
Traits géologiques de la région du torrent du Merdarêt (Gidon, 2004 ; cliché M.Lemoine)

Le bassin de réception a un aspect très tourmenté avec de nombreux plis et fissures dans des terrains friables ayant une grande alternance de couches plus ou moins tendres. Le mode de fonctionnement de ce torrent est similaire à celui du Manival et tous deux sont classés empiriquement par les agents du service de la RTM dans les torrents "à clappes".

D. Couverture végétale

Actuellement, le cône de déjection est totalement végétalisé principalement par la forêt. Par contre dans le bassin de réception la végétalisation est quasiment impossible du fait de l'activité érosive permanente, et on observe sur presque toute la surface un sol nu formé de nombreux affleurements rocheux. Toutefois certains secteurs restreints, comme des éboulis stabilisés, sont recouverts d'une végétation pauvre composée d'herbacées et de quelques pins isolés (**Cf. Fig. 4-4**).

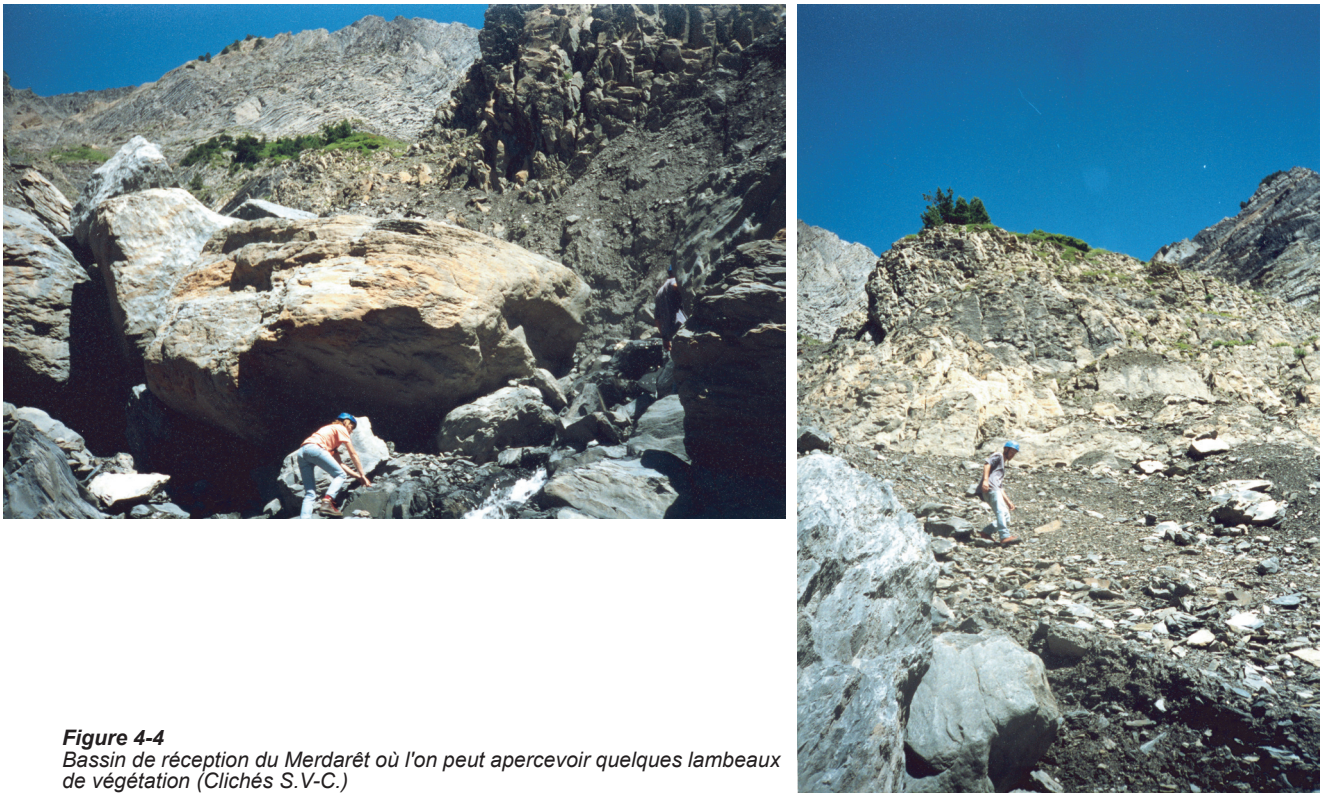


Figure 4-4
Bassin de réception du Merdarêt où l'on peut apercevoir quelques lambeaux de végétation (Clichés S.V-C.)

E. Pluies extrêmes

A partir d'une vingtaine de postes de mesure des précipitations, pluviomètres ou pluviographes, répartis dans un rayon inférieur à 30 km du Col d'Ornon, une étude régionale des précipitations propose pour le bassin versant supérieur du Merdarêt les valeurs suivantes [Koulinski, 2004]:

- pluie journalière "décennale": 85 mm,
- pluie journalière "centennale": 132 mm.

D'après la documentation de gestion du service de la RTM [1986], les laves torrentielles sur le bassin des Pâles (voisin du Merdarêt) se sont déclenchées suite à des précipitations de 25 à 40 mm sur 2 heures ou 40 à 100 mm sur 24 heures. Cela montre notamment que les laves ne sont pas systématiquement corrélées aux précipitations orageuses dont la fréquence est plus élevée.

1.2.2. Les transports solides du bassin versant du Merdarêt.

A. Evénements torrentiels connus

Quelques crues torrentielles, certainement les plus importantes, sont mentionnées dans les archives du service de la RTM montrant une forte activité de transport solide depuis de nombreuses années :

- les 3 et 4 septembre 1848, le torrent a changé de lit sur son cône de déjection, menaçant alors directement des cultures et les hameaux des Sciauds et de Villelonge dans la partie amont de la commune de Chantelouve, pour rejoindre le cône du torrent des Pâles avant d'atteindre le cours de la Malsanne dont le lit s'exhausse.
- le 29 août 1946, une crue importante coupe la route qui conduit au col d'Ornon.
- le 22 septembre 1958, une crue obstrue à nouveau la route du col d'Ornon.
- en juin 1990, la chaussée a été dégagée des dépôts par la DDE (Direction Départementale de l'Equipement) et la plage de dépôt curée de 8 000 m^3 par le service de la RTM.
- les 6 et 7 juillet 1996, suite à des orages importants sur la Tête des Filons et des Pâles, des laves torrentielles se sont déposées sur la route et la portion de chenal juste en amont de celle-ci.
- le 5 juin 1998, événement identique à celui de 1996 avec en plus des dépôts dans les trois plages et dans le chenal des Pâles juste en amont de la confluence avec le Merdarêt.
- vers le 27 juillet 1998, un événement similaire se serait produit.
- le 4 septembre 1998, après des pluie soutenues et fortes durant quatre heures sur la commune de Chantelouve, une lave torrentielle a coupé la route et a nouveau déposé des matériaux dans le chenal des Pâles juste en amont de la confluence avec le Merdarêt (un mètre d'épaisseur sur 100 mètres de long).

Le 24 juillet 2000, une lave torrentielle assez importante a endommagé 30 ouvrages RTM dont deux ont été totalement détruits. Sur la route départementale menant au col d'Ornon, des matériaux ont dû être évacués sur près de 500 mètres de long. C'est cet événement que nous avons étudié, estimé à au moins 25 000 m^3 pour l'ensemble du "grand bassin versant" (plus de 20 000 m^3 dans les trois plages de dépôts voire 10 000 m^3 dans chacune d'elle, dépôts sur la route, plus 10 000 m^3 de dépôt à l'aval de la confluence avec la Malsanne). Actuellement, il se produit quasiment chaque année un événement torrentiel. Plus récemment, notons encore les crues de 2002 et de 2003.

B. Aménagements de la RTM

Bien que des aménagements pour revégétaliser le versant soient visibles près de la plage de dépôt supérieure du Merdarêt en rive gauche, le bassin de réception de ce type de torrent se prête mal au boisement. En revanche, les ouvrages de génie civil sont nombreux.

Les premiers travaux de correction du torrent du Merdarêt ont été entrepris dès 1904, avec la construction jusqu'en 1907 d'une soixantaine d'ouvrages, seuils et barrages en pierres sèches, dans les branches principales et secondaires du bassin de réception et de la partie amont du cône. Beaucoup de ces ouvrages, en particulier dans les ravins amont dont l'accès est devenu extrêmement dangereux, n'ont pas été entretenus et ont disparu. Cela s'explique également par l'intérêt d'un aménagement prioritaire du torrent adjacent des Pâles alors plus menaçant pour les habitations, tandis que le torrent du Merdarêt n'engendrait bien souvent que des dégâts mineurs : dépôts sur la route du col d'Ornon, dans des pâturages ou taillis. Pour favoriser l'écoulement des transports solides en évitant les débordements, une digue de 275 mètres de long fut construite à l'aval de la route en 1958, délimitant ainsi une zone de dépôt correspondant à l'une des plages actuelles. De plus, en amont de cette route, des digues en gabions devaient permettre un écoulement satisfaisant des laves dans le chenal en contenant l'amplitude des alternances de remblaiement et d'affouillement du lit [R.T.M., 1986]. Cette plage de dépôt, entre la route et la confluence de l'époque avec le torrent des Pâles, fut délimitée à l'aval par un ouvrage RTM en béton avec pertuis en 1985. Il constitue la limite du bassin versant étudié ici.

Dans les années suivantes, le torrent des Pâles a subi d'importants aménagements : la construction d'une plage de dépôt juste à la sortie des gorges rocheuses en amont du cône de déjection, et le raccordement du chenal au torrent du Merdarêt beaucoup plus en amont (**Cf. Fig. 4-2**). Ces mesures éloignent les transports solides des habitations et suppriment un passage à gué sur la route départementale. Hormis quelques ouvrages RTM construits dans le chenal en amont de la route, l'aménagement récent le plus important a été la mise en place d'une seconde plage de dépôt, en 1989, en amont du cône juste à la sortie des gorges du bassin de réception.

Pour résumer, le bassin du Merdarêt étudié comprend deux plages de dépôt et reçoit le torrent des Pâles. Ce dernier transmet généralement plus d'apports liquides que solides du fait de sa propre plage de dépôt. Ultérieurement à la crue de 2000, plusieurs ouvrages ont été restaurés ou reconstruits : "barettes en L" juste en amont de la route, barrages à l'aval de la confluence avec les Pâles. Des aménagements sont en cours d'étude pour modifier à nouveau la jonction entre les deux torrents.

C. Transports solides

Une très grande partie des bassins de réception peut être considérée comme une zone de production sédimentaire active, bien que l'érosion soit plus accentuée localement, à proximité de failles par exemple

(**Cf. Fig. 4-5**). Leurs surfaces réelles sont d'environ 1,3 km² pour le Merdarêt et 0,6 km² pour les Pâles. C'est le principal apport de matériaux au torrent.

Figure 4-5
Production détritique bien marquée de certaines zones du bassin de réception du Merdarêt (Clichés S.V-C.)

Le transit naturel des matériaux est fortement perturbé par les trois plages de dépôt. A l'aval de celles-ci, on observe systématiquement une érosion accentuée du fond du chenal, phénomène classique engendré par une baisse brutale du débit solide qui modifie l'équilibre du système torrentiel. Sur le Merdarêt, ce phénomène est également visible à l'aval de la confluence avec les Pâles, pour les mêmes raisons : le rapport débit liquide sur débit solide est généralement très fort car les matériaux sont stockés dans la plage de dépôt des Pâles et en aval de celle-ci dans la partie de chenal de faible pente jusqu'au torrent du Merdarêt.

Le curage régulier du chenal et surtout des plages de dépôt donne cependant une idée du taux de production sédimentaire actuel. L'apport annuel moyen de matériaux sur plus de dix ans est de l'ordre de 4 000 m^3 pour chacune des trois plages de dépôt soit environ 12 000 m^3 pour l'ensemble du bassin versant (**Cf. Tab. 4-1**), ce qui équivaut à un taux d'érosion moyen d'environ 6,3 mm/an. L'évaluation faite dans le procès-verbal d'aménagement par le service de la RTM [1986] indiquait un volume de production sédimentaire d'environ 3 500 m^3 pour le "grand" Merdarêt (2,7 mm/an) et 1 500 m^3 pour les Pâles (2,4 mm/an). Cette estimation semble avoir été largement sous évaluée.

Tableau 4-1
Volumes de matériaux extraits des plages de dépôt du torrent du Merdarêt ; source Sommiers de la forêt (service RTM) et Etude d'aménagement (*) de Koulinski (2004)

Années	Volumes de matériaux curés dans les plages de dépôt (m^3)		
	Merdarêt amont (n°3)	Les Pâles (n°2)	Merdarêt aval (n°1)
1985			Construction en 1985
1986			5 400
1987		Construction en 1988	7 800 à 8 000*
1988		6 000 à 12 000	9 600
1989	Construction en 1990		2 500
1990	1 700 à 6 000*	6 500	8 700
1991	11 000* à 13 000	5 000* à 9 200	6 000* à 7 200
1992	8 000* à 9 600	4 000*	4 000*
1993	3 500	4 000	
1994	5 000 à 6 000*	3 000	5 000 à 6 000*
1995	0	3 000	
1996	3 000* à 5 000		1 000*
1997			1 000*
1998		3 000	
1999	4 000* à 9 000	2 000 à 7 000*	2 000 à 3 000*
2000		8 500	5 500 à 9 000*
2001	7 100	5 400	7 500
2002			1 500
2003			1 850
Total	43 300 à 53 200	50 400 à 68 600	69 350 à 76 250
Moyenne	3 100 à 3 800	3 150 à 4 300	3 850 à 4 750

1.2.3. Caractéristiques générales du bassin versant des Arches.

A. Situation

S'étendant au pied des falaises calcaires Urgoniennes du Vercors, en bordure occidentale du Trièves, le torrent des Arches est situé sur la commune de Chichilianne, à l'extrême sud-ouest du département. Il se jette dans le ruisseau de Charbonnier. Ce dernier draine un vaste bassin versant au sud de Chichilianne jusqu'au col du Prayet, où dans l'ensemble, l'érosion est modérée, sauf à l'extrémité amont du bassin. Le torrent des Arches est le seul à lui apporter de grandes quantités de matériaux. Après le village de Chichilianne, les eaux se jettent dans le torrent de Donnière, lui-même affluent de l'Ebron faisant partie du bassin moyen du Drac.

B. Morphologie générale

Le torrent des Arches est constitué d'un bassin de réception très profondément encaissé dans les barres calcaires qui forment la retombée est des Haut-Plateaux du massif du Vercors (**Cf. Fig. 4-6**). Sa surface est d'environ 1,36 km². Le talweg principal prend naissance à 1900 mètres d'altitude et reste bien marqué jusqu'à la côte 1300, après une gorge, où il draine les trois quarts du bassin. Seul un ravin affluent le rejoint très en amont vers 1400 mètres d'altitude. En aval, le torrent longe le massif du Banon en rive droite, la rive gauche étant matérialisée par une digue jusqu'à une plage de dépôt. Puis il rejoint le ruisseau du Charbonnier à environ 1030 mètres d'altitude. Deux zones se distinguent donc nettement : le bassin de réception, au-dessus de 1300 mètres d'altitude, et le cône de déjection, actuellement largement aménagé. Le chenal d'écoulement est quasiment inexistant, malgré la présence de la gorge, ce qui est caractéristique des torrents de ce secteur. La courbe hypsométrique est de forme convexe vers le haut, ce qui indique un pourcentage important des zones à forte pente d'altitude favorisant une concentration rapide des eaux de pluie. Le cône de déjection est, quant à lui, étendu. En l'absence d'aménagements, le lit du torrent pourrait être de ce fait particulièrement instable sur le cône puisqu'il

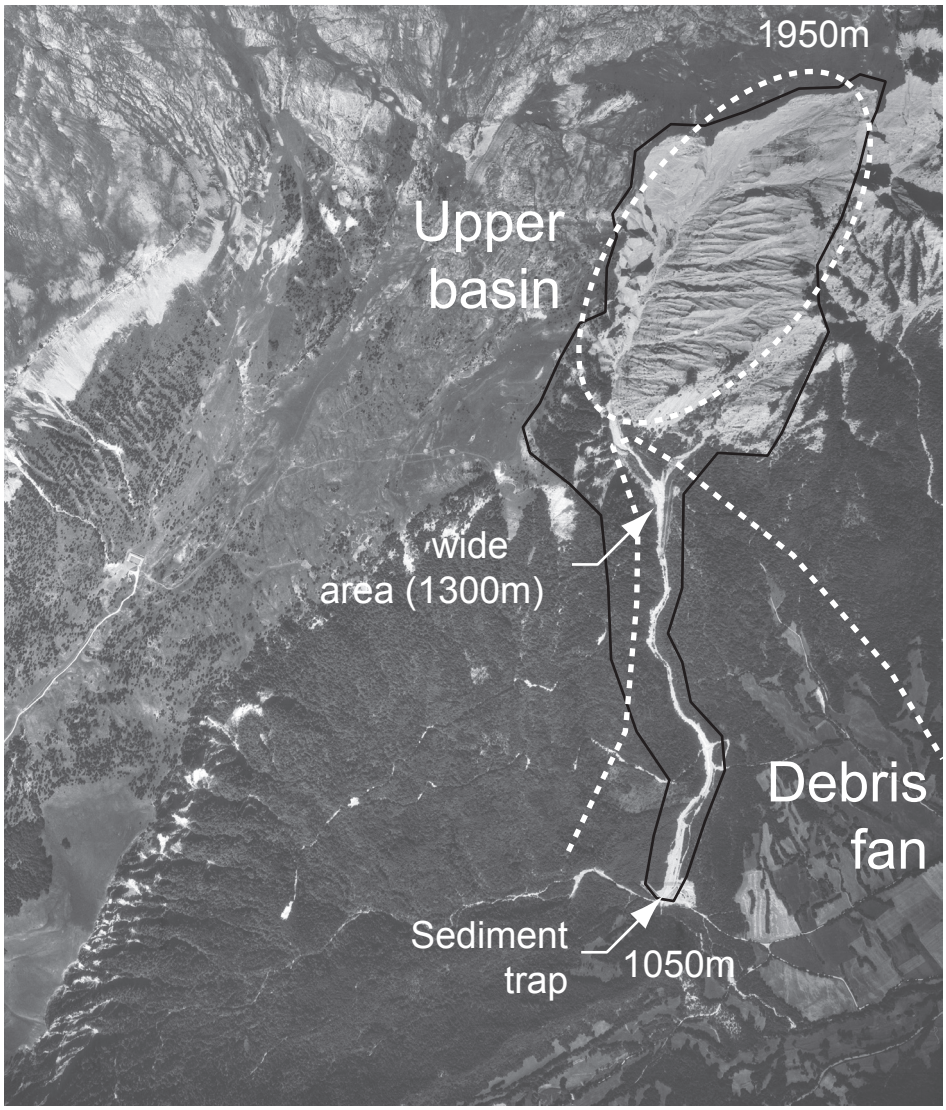


Figure 4-6
Le bassin versant des Arches (photographie aérienne de 1998, mission FD38 environ au 1/25 000e)

ne possède pas de véritables berges, comme le confirment les dépôts de la crue de 1972 devant l'église du village de Chichilianne.

C. Géologie et lithologie

Le bassin de Chichilianne est une vaste combe, d'axe approximatif nord-sud, creusée au fil du temps par l'érosion dans les terrains tendres du Berriassien, Valanginien, Hauterivien et Barrémien inférieur, composés de calcaires argileux et de marnes. Cette dépression est limitée par des roches plus dures : à l'est, le Tithonique formé de calcaires lithographiques durs du Jurassique supérieur qui dominent la cuvette du Trièves (roc de Trézanne, rochers de Goutaroux, sommets des Carbones et du Platary), et à l'ouest, l'Urgonien composé de calcaires bioclastiques durs du Barrémien inférieur, dont le Mont-Aiguille, prisme de 400 mètres de hauteur, constitue un bel exemple de butte témoin ayant mieux résisté à l'érosion. Le bassin versant des Arches se situe du coté ouest de cette combe. La série stratigraphique

des roches affleurantes, de l'amont à l'aval, se présente de la façon suivante (carte géologique détaillée de la France au 1/50 000- Feuille XXXII-37 de Mens, 1974) :

- Barrémien inférieur (calcaires argileux gris)
- Hauterivien (Schistes gris de Chichilianne)
- Hauterivien (alternances de calcaires gris et marnes bleues)
- Terrains quaternaires et alluvions, récents à Wurmien.

Plus concrètement, la paroi verticale et d'aspect jaunâtre de l'Urgonien dans la partie sommitale contraste avec les formes sous-jacentes grisâtres et "pourries" du Barrémien vaseux dans lesquelles naissent le torrent et ses diverses ramifications. Ces derniers versants de calcaires marneux sont composés de nombreuses ruptures de pentes, dues aux alternances de strates dures et tendres, sur lesquelles s'accumulent de petits éboulis actifs inaccessibles (**Cf. Fig. 4-7**).

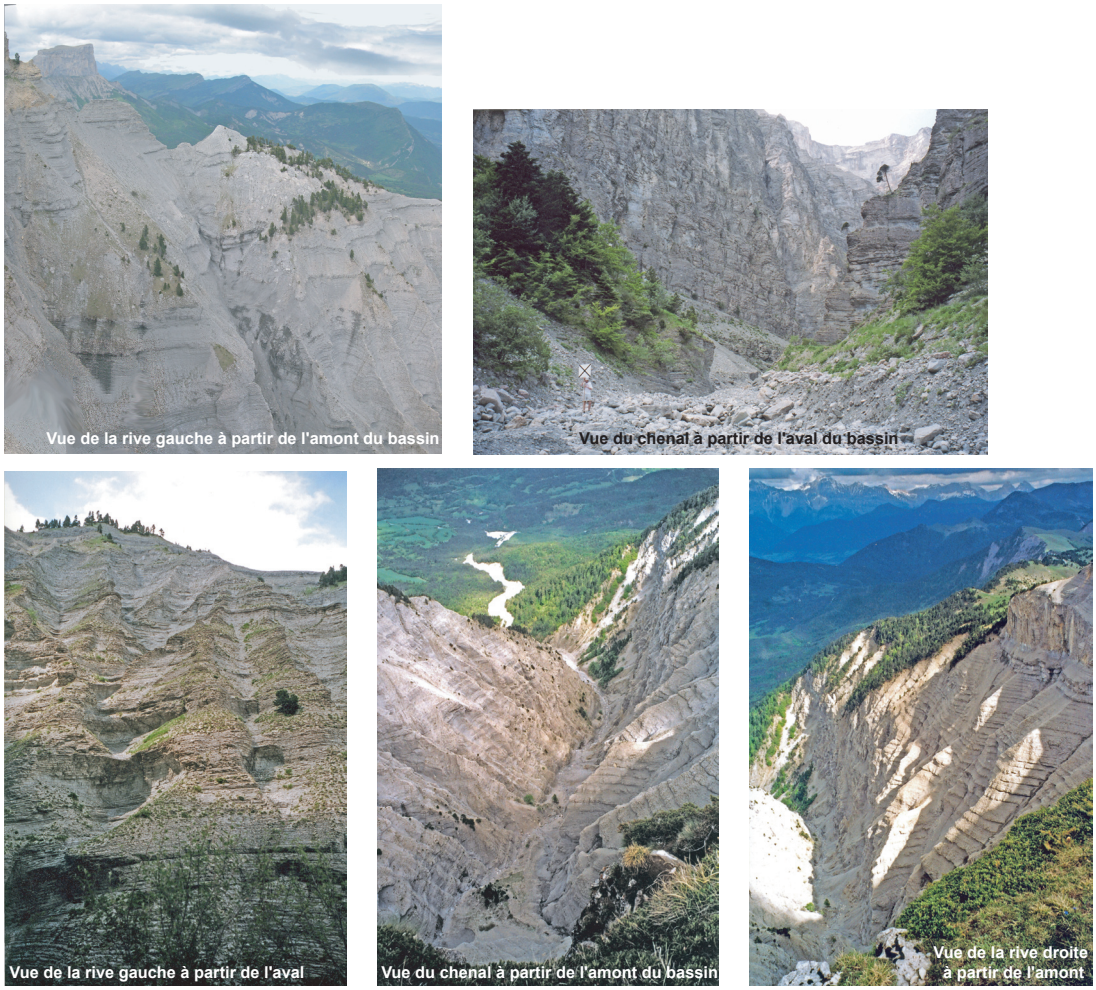


Figure 4-7
Bassin de réception des Arches composé de hautes barres rocheuses (plus de 150 m) alternant des strates de roches dures et de roches tendres (Clichés S.V-C.)

D. Couverture végétale

Jusqu'à la Révolution, le territoire de Chichilianne était rattaché administrativement au Diois, plus au sud, et les évêques de Die possédaient la majeure partie des forêts et des pâturages sur lesquels les

habitants du bassin exerçaient divers droits d'usages. Au XVII^{ème} siècle, l'industrie de la métallurgie du fer consommait d'énormes quantités de charbon de bois. Ainsi, une déforestation importante, associée à un pâturage intensif, furent responsables d'une dégradation avancée du massif forestier dont certaines traces sont encore visibles actuellement. Bien entendu, pour le bassin versant des Arches cette dégradation n'affecte pas le bassin de réception, déjà largement dénudé à cause de sa lithologie évoquée au paragraphe précédent. Les terrains ne supportent que de maigres pelouses d'altitude sur des zones protégées où émergent çà et là quelques pins à crochets et alisiers rabougris. Finalement, la couverture végétale, arbustive ou herbacée, ne représente qu'environ 41% de la surface totale du bassin.

E. Conditions climatiques

La proximité du massif du Vercors et la situation du bassin en zone de moyenne altitude, lui confèrent un climat plutôt montagnard. Les précipitations sont assez régulières durant l'année avec toutefois une diminution durant l'été où les pluies tombent alors souvent sous forme de violents orages. Les précipitations annuelles à Chichilianne, 990 mètres d'altitude, sont de l'ordre de 1200 mm. On estime que vers 1500 mètres d'altitude elles dépassent 1400 mm, car d'une manière générale les précipitations augmentent avec l'altitude. Le village de Mens, au centre de la cuvette du Trièves, bénéficie d'un climat d'abri maximum par rapport aux précipitations apportées par les vents dominants d'ouest.

Les premières chutes de neige apparaissent fréquemment dès le mois de novembre et cette dernière peut subsister jusqu'au mois de mars. C'est un enneigement moyen qui suffit au déclenchement d'avalanches empruntant généralement le lit du torrent.

Quant aux débits, ils ont été estimés par le service de la RTM, entre 5 et 10 m^3/s pour le débit centennal et plus de 1,5 m^3/s pour le débit décennal, en fonction de relations empiriques entre le débit et la surface du bassin versant. Les valeurs de ce débit liquide qui ne sont pas exceptionnelles, ne reflètent pas du tout les quantités importantes de matériaux que le torrent peut effectivement transporter sous forme de laves torrentielles.

1.2.4. Les transports solides du bassin versant des Arches.

A. Evénements torrentiels connus

Comme nous l'avons déjà souligné pour le torrent du Manival, il n'a pas été possible d'obtenir une liste exhaustive de tous les événements torrentiels. Mougin [1914] cite un débordement en 1892 du ravin des Arches de Chichilianne qui emporta plusieurs hectares de culture. Au cours du XX^{e} siècle, les dates des crues les plus importantes retenues sont les suivantes : 1928, 1935, 1954, 1969, 1972, 1973, 1986 (juin et août), 1987 (juillet), 1992 [R.T.M., 2003]. Les plus spectaculaires furent celles de 1972 et 1973, en particulier la crue estivale de 1972 où des matériaux arrivèrent jusqu'au village de Chichilianne. Les crues les plus récentes qui nous intéressent plus particulièrement sont :

- la crue de septembre 1998,

- la crue du 06 août 1999,
- la crue du 13 août 2000,
- la crue de septembre à octobre 2000.

La dernière crue en date est celle d'octobre 2003 avec un dépôt d'environ 3 000 m^3 à la plage de dépôt.

B. Aménagements de la RTM

Après une proposition de création d'une série de restauration en 1888, puis une loi en 1901 reconnaissant les travaux à entreprendre d'utilité publique, c'est finalement en 1928 que fut créée la série domaniale, terrain géré par le service de la RTM. Agrandie par la suite, elle représente maintenant environ 500 ha regroupant quatre torrents à proximité du village de Chichilianne. Ce n'est qu'à partir de 1954 que de réels travaux de correction torrentielle débutèrent. Jusqu'en 1969, il ne s'agissait que de la construction de digues latérales sur le cône de déjection, ainsi que de rectifications répétées du lit du torrent. En 1970, le premier ouvrage en béton, un barrage poids de 1,70 mètre de hauteur sous cuvette, fut construit sur le cône de déjection actif. Cet ouvrage provoque le dépôt des matériaux et évite ainsi des débordements en rive gauche sur des terrains cultivés. Toutefois, après les débordements plus en amont des crues de 1972 et 1973, un second ouvrage fut construit en 1976, dans la partie amont de la gorge conformément à la plupart des aménagements dans les bassins de réception des torrents gérés par le service de la RTM. Il s'agit d'un barrage auto-stable en béton armé de 7,50 mètres de haut sous cuvette. Pour éviter son affouillement, un contre barrage en blocs de béton préfabriqués de 6 mètres de hauteur a été réalisé juste en aval en 1979. En complément de ces travaux, sur le cône de déjection, une digue impressionnante d'environ trois mètres de hauteur suit le torrent en rive gauche sur toute sa longueur. Cette digue est composée de matériaux déposés par le torrent et peut donc, malgré quelques protections en enrochements, être facilement affouillée par ce dernier s'il divague. Pour éviter ce phénomène, le lit est régulièrement curé. Enfin, en 1993, une plage de dépôt fut édifiée et fermée à son extrémité aval par un barrage qui, malgré la présence de cinq fentes, stoppe le transit sédimentaire de la charge solide la plus grossière qui nous intéresse. La capacité de cette plage de dépôt est de l'ordre de 2 500 m^3 à proximité de l'ouvrage, mais la largeur importante du chenal (environ 20 mètres) sur toute la longueur du cône de déjection (environ 1600 mètres) permet le stockage d'une très importante quantité de matériaux.

C. Transports solides

Le transport solide dans le torrent n'est pas régulier et il est donc difficile, en l'absence d'un suivi approfondi sur de nombreuses années, d'estimer un volume moyen annuel des sédiments transportés. Le barrage et le contre barrage édifiés à la fin des années soixante-dix ont retenu un volume de matériaux d'environ 8 000 m^3, or leur atterrissement s'est achevé à l'automne 1979. Pour cette période de quatre années la moyenne serait donc de 2 000 m^3/an [R.T.M., 1982]. Cette valeur n'est pas forcément très représentative du fait de la durée restreinte d'une part, mais aussi de la localisation de l'ouvrage très

Tableau 4-2
Volumes de matériaux extraits de la plage de dépôt du torrent des Arches ; source Technicien du service de la RTM et Rapport de révision d'aménagement (*) (R.T.M., 2003)

Années	Volumes de matériaux curés dans la plage de dépôt des Arches (m^3)
1997	2 500
1998	0 à 3 000*
1999	4 000* à 12 400
2000	12 000
2001	0
2002	12 000
Total	38 900
Moyenne	6 500

en amont du bassin d'autre part. Au niveau de la plage de dépôt, les données d'extraction de matériaux ne sont disponibles que depuis 1997 (**Cf. Tab. 4-2**). La moyenne sur ces six années est d'environ 6 500 m^3/an.

Les matériaux du torrent proviennent essentiellement des barres calcaires du bassin de réception, soit directement, soit indirectement par les éboulis et les petites ravines. Ce sont les strates du Barrémien qui fournissent le plus de matériaux facilement mobilisables, alors que les énormes blocs provenant des strates de l'Urgonien semblent rarement mobilisés et ont alors un effet de seuil naturel dans le lit du torrent lorsqu'il ne les contourne pas. Ces apports sont relativement réguliers à l'échelle de temps pluriannuelle, mais une grande quantité de matériaux peut également s'ajouter de manière très irrégulière et peu prévisible par éboulement ou écroulement. Un autre apport potentiel provient du volume de matériaux stocké par le "barrage RTM" si celui-ci venait à céder, ce qui est envisageable compte tenu de sa position dans la gorge et de l'état du contre-barrage (actuellement non entretenu de manière volontaire) (**Cf. Fig. 4-8**). Dans ce cas, certains éboulis longeant le chenal pourraient être déstabilisés. Sur le cône, la berge en rive droite est par endroits sapée et érodée, mais ces apports sont sans aucun doute bien plus faibles, d'autant que la gestion par le service de la RTM limite cette érosion.

Figure 4-8
Barrage et contre-barrage de correction torrentielle dans la gorge du chenal des Arches. Le mauvais état et les blocs en bétons disloqués du contre-barrage sont bien visibles sur la photographie de gauche. Si le barrage venait à céder, il libèrerait de grandes quantités de matériaux comme le montrent les photographies de droite (Clichés S.V-C.)

2. Application de la méthode PREVENT

2.1. Torrent du Merdarêt

2.1.1. Données utilisées

Parmi les événements torrentiels récents ayant eu lieu dans le torrent du Merdarêt, la lave torrentielle du 24 juillet 2000 a été décrite par les agents du service de la RTM. Nous nous sommes focalisés sur cet événement durant lequel 28 seuils construits dans le chenal ont été endommagés et deux totalement détruits. Comme souvent lorsque des laves torrentielles surviennent dans ce torrent, la route départementale menant au Col d'Ornon a été coupée. Les deux plages de dépôt ont été remplies par environ 10 000 m^3 de sédiments chacune. Cette lave torrentielle a donc été estimée à 20 000 m^3 pour le bassin versant qui nous concerne. Dans le torrent des Pâles, affluent du Merdarêt, la plage de dépôt était également remplie par environ 10 000 m^3 de sédiments, et très peu de matériaux ont pu atteindre le torrent du Merdarêt. La passerelle enjambant le chenal des Pâles, juste en amont de sa jonction avec le Merdarêt, n'a pas été détruite contrairement à l'année suivante (crue du 9 août 2001) ; seul un faible débordement était observable à ce niveau. Nous avons donc négligé cet apport. Le service de la RTM détient également des informations que nous avons utilisées, sur l'histoire du torrent, en particulier ses aménagements et entretiens successifs.

L'autre type de données, primordial pour notre étude, est la série des photographies aériennes disponibles. Nous avons utilisé des photographies aériennes provenant des services de l'IGN, prises deux jours avant l'événement. Ces photographies ont une échelle moyenne de 1/25 000^e. Elles nous ont permis d'estimer le volume maximum possible d'une lave torrentielle avant l'événement du 24 juillet 2000, en utilisant la méthode développée (PREVENT), suite à l'étude détaillée du torrent du Manival.

2.1.2. Résultats de la méthode PREVENT

La méthode de mesure et de calcul que nous avons développée (PREVENT) a été appliquée à partir des photographies d'archives. En référence à cette méthode, le résultat estimant le volume maximum d'une lave torrentielle n'a pris en compte que les biefs ayant une pente moyenne supérieure à 8°. Sur le torrent du Merdarêt, cette limite se situe au niveau du radier qui traverse la route départementale ; la plage de dépôt aval n'a donc pas été utilisée pour cette estimation.

L'utilisation des photographies pour ce torrent a posé un problème supplémentaire par rapport à l'utilisation des photographies d'archive du Manival : en fonction des prises de vues, la mesure précise de la largeur du chenal n'a pas été possible pour tous les profils en travers à cause de la présence d'arbres bordant le chenal. Nous avons alors corrigé les valeurs des largeurs à l'aide de mesures prises sur le terrain.

Le tableau 4-3 présente les résultats de PREVENT en fonction des deux hypothèses de profils de référence. Le volume estimé est compris entre 20 000 m^3 et 64 000 m^3.

Tableau 4-3
Volumes potentiels de matériaux accumulés dans le chenal du Merdarêt en 2000 et estimation du volume maximum transportable par une lave torrentielle selon la méthode de PREVENT (en gras)

Bassin versant en amont de :	Distance sur le profil en long à partir de la plage de dépôt aval	Hypothèse minimaliste	Hypothèse maximaliste	**Médiane**
Plage de dépôt amont	1502 m	-2 447	8 725	3 139
Jonction avec l'affluent des Pâles	820 m	13 169	33 391	23 280
Radier sur la route départementale (**PREVENT**)	272 m	**19 684**	**64 048**	**41 866**
Plage de dépôt aval	0 m	25 009	82 179	53 594

L'estimation de l'erreur sur le volume total est d'environ 12% pour le torrent du Manival. Il est possible de refaire les calculs pour le torrent du Merdarêt où 45 profils en travers ont été levés. Pour ne pas minimiser l'erreur, les calculs ont été faits à partir du volume de l'hypothèse maximaliste. La largeur moyenne de ces transects est de 17 mètres, et leur équidistance, soit la longueur moyenne que représente chaque transect, est de 37 mètres. Nous avons trois types d'erreurs qui se cumulent :

- environ 4,5% pour une équidistance de 50 mètres entre les transects (**Cf. Fig. 2-33**),
- une erreur en écart-type de 27 cm sur les hauteurs moyennes des transects modélisés (**Cf. Fig. 2-32**), que l'on peut convertir en pourcentage sur le volume avec les caractéristiques de ce torrent en calculant l'erreur quadratique moyenne (**Cf. équation *2-12***) :

$$37 \text{ X } 17 \text{ X } 0{,}27 \text{ X } \sqrt{45} = 1\,139 \text{ (en m}^3\text{)} \qquad (4\text{-}1)$$

$$\frac{1\,139}{64\,000} = 0{,}0178 \text{ soit environ } 1{,}8\% \qquad (4\text{-}2)$$

- une erreur de mesure submétrique sur les photographies estimée à un écart-type de l'ordre de 93 cm, avec quelques points fixes du chenal du Merdarêt. Le même calcul peut alors être fait :

$$37 \text{ X } 17 \text{ X } 0{,}9 \text{ X } \sqrt{45} = 3797 \text{ (en m}^3\text{)} \qquad (4\text{-}3)$$

$$\frac{3\,797}{64\,000} = 0{,}0593 \text{ soit environ } 5{,}9\% \qquad (4\text{-}4)$$

L'erreur totale pour le Merdarêt est donc au maximum de l'ordre de 12,2%, soit un volume d'environ 7 680 m^3.

L'observation des niveaux d'érosion maximum du chenal dans le torrent du Manival à partir de plus de dix profils en long mesurés à des dates différentes, suggère que le niveau réel se situe entre le PLAN sup. et le PLAN inf. L'estimation du volume maximal d'une lave torrentielle sur le torrent du Merdarêt au 22 juillet 2000 est alors estimé à environ 42 000 m^3 (médiane entre 20 000 m^3 et 64 000 m^3). Dans ce cas, l'écart entre la valeur estimée par la médiane et les deux hypothèses (maximaliste et minimaliste) est de 52%. Cette imprécision fournie par la méthode reste pour le moment bien supérieure au pourcentage d'erreur provenant des mesures (7 680 m^3, soit 12,2%).

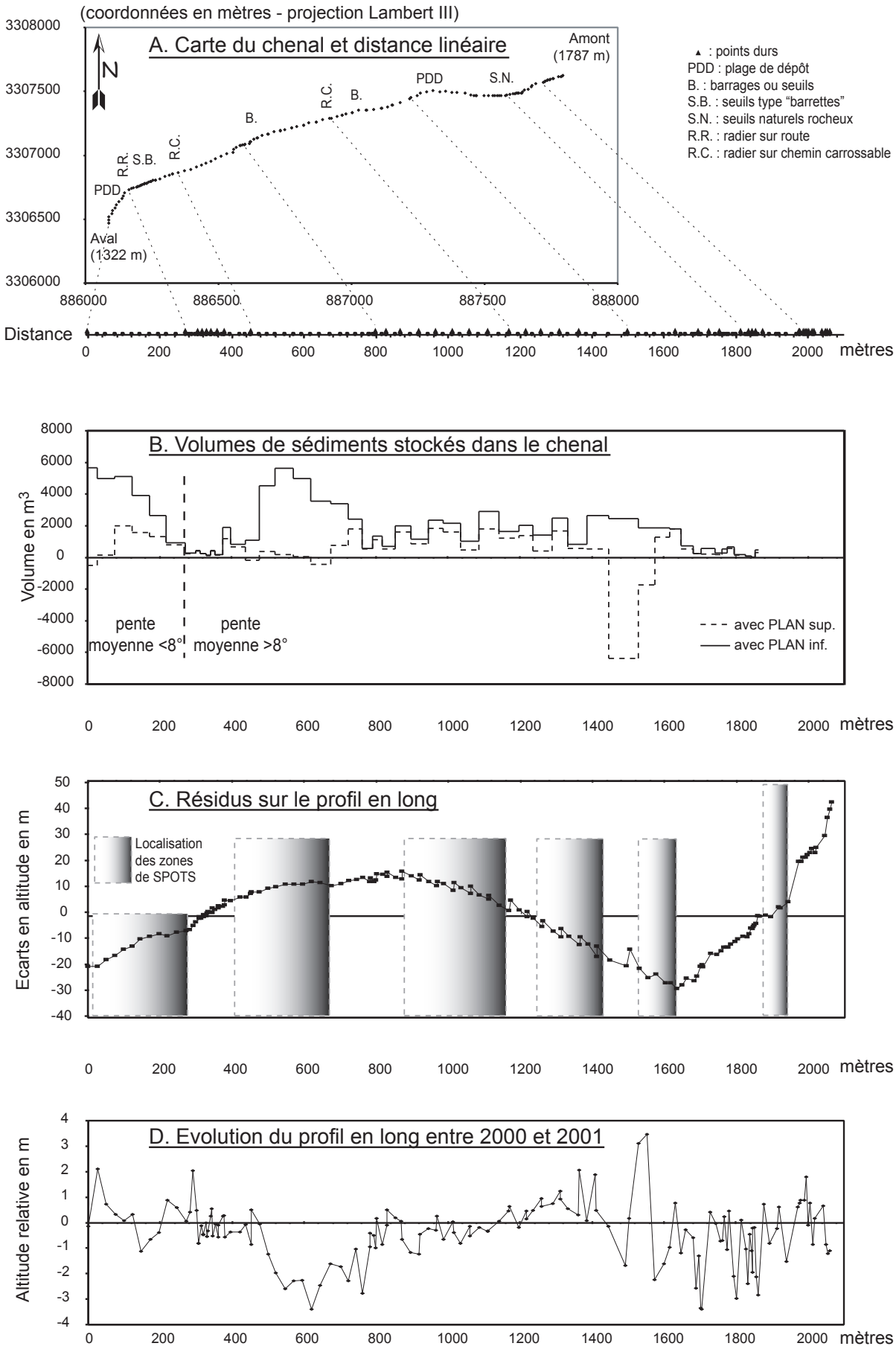


Figure 4-9
Analyse des mesures effectuées sur le torrent du Merdarêt

Pour affiner ce résultat il est intéressant de connaître la répartition de ce volume de matériaux sur le linéaire du chenal torrentiel. Le stockage des matériaux joue un rôle prépondérant pour la lave torrentielle, soit sur l'initiation de celle-ci, soit sur le volume sédimentaire et l'endroit de son dépôt. La **figure 4-9 B** indique un stock de matériaux important à une distance comprise entre 440 mètres et 760 mètres en amont de l'ouvrage de la plage de dépôt aval. On remarque également, plus en amont, plusieurs tronçons de chenal ayant un stock de matériaux supérieur à 2 000 m^3. Quant aux plages de dépôts, bien que curées près de l'ouvrage terminal, elles ne semblent pas être totalement vides.

2.1.3. Zones de SPOTS du chenal

Certaines zones du chenal semblent avoir une capacité de stockage sédimentaire plus importante que d'autres. Ces zones de SPOTS privilégiées, comme nous l'avons vu sur le torrent du Manival, jouent certainement un rôle prépondérant dans la dynamique de migration des sédiments vers l'aval. Lorsqu'une de ces zones est vide, elle a la capacité d'accueillir une grande quantité de matériaux voire de stopper la lave torrentielle ; au contraire lorsqu'elle est pleine, elle peut participer fortement au développement de la lave en lui fournissant une charge à transporter.

Comme nous l'avons montré précédemment, l'indicateur le plus pertinent pour déterminer les zones de stockage temporaire (SPOTS) est la pente, ou plus précisément la rupture de pente dans le profil en long. En effet, les zones d'accumulation sédimentaire se situent dans les parties concaves du profil en long. La difficulté majeure pour les localiser réside dans le fait qu'il existe un emboîtement d'échelles et un lien fort entre les grandes ruptures de pente et les plus grandes zones de stockage sédimentaire d'une part, et entre les ruptures de pentes plus restreintes et les petites zones de stockage d'autre part. Cette dernière situation est souvent créée artificiellement par l'implantation des barrages dans le chenal. Les petites zones de stockage peuvent influencer les plus grandes, mais lors d'événements importants, leur rôle est certainement insignifiant.

En pratique, nous avons vu qu'il était difficile d'observer avec précision les ruptures de pente directement, que ce soit sur un graphique représentant le profil en long du torrent ou sur un graphique des pentes du chenal. C'est pourquoi nous avons utilisé un graphique représentant les résidus du profil en long, comme pour le torrent du Manival (**Cf. Fig. 3-43**). Ce graphique (**Cf. Fig. 4-9 C**) doit être lu de l'amont (droite) vers l'aval (gauche), et chaque rupture de pente indique une partie concave ou convexe du profil en long. Généralement, lorsque les zones de SPOTS ont été localisées à l'aide des graphiques, il est possible de faire une vérification complémentaire de terrain : les ruptures de pente sont visibles, et les amplitudes de remplissage du chenal peuvent être estimées par des indicateurs indirects comme l'altitude relative de la végétation sur les berges.

Le graphique de la **figure 4-9 C** montre les principales zones de stockage temporaire détectées. Les plus évidentes sont bien entendu les plages de dépôts qui sont des zones de SPOTS artificielles, alors qu'il est plus difficile de déterminer ces zones dans les biefs équipés de nombreux barrages.

2.2. Torrent des Arches

2.2.1. Données utilisées

Comme pour le torrent du Merdarêt, nous nous sommes intéressés aux événements récents. Malheureusement, nous n'avons pas un unique événement important, mais quatre laves torrentielles d'un volume modeste réparties sur trois années :

- 6 000 m^3 en septembre 1998, dont 3 000 m^3 seulement ont atteint la plage de dépôt et 3 000 m^3 sont restés dans le chenal plus en amont à la sortie de la gorge,
- 10 000 m^3 en juillet 1999 déposés à la plage de dépôt,
- 10 000 m^3 en août 2000 déposés à la plage de dépôt et
- en septembre et octobre 2000 où le dépôt arrivé jusqu'à la plage n'est pas connu.

Ces volumes ont été estimés par les agents de la RTM. Le volume total au niveau de la plage de dépôt est supérieur à 23 000 m^3, ce qui correspond assez bien aux 24 400 m^3 de matériaux extraits durant ces mêmes années (**Cf. Tab. 4-2**). On peut remarquer la difficulté rencontrée pour obtenir des informations fiables sur les volumes, bien que celles-ci proviennent du même service (RTM) : en 1999, le technicien de secteur indique 12 500 m^3 de matériaux extraits à la plage de dépôt en se référant au sommier de la forêt, le rapport de révision d'aménagement [R.T.M., 2003] mentionne une valeur de 4 000 m^3, alors que la fiche événement mentionne un dépôt de 10 000 m^3.

La même technique de stéréophotogrammétrie que sur les autres torrents a été utilisée pour déterminer le volume maximum d'une lave torrentielle, à partir de photographies aériennes d'archives disponibles auprès des services de l'IGN. Ces photographies ont été prises en juillet 1998, et ont une échelle moyenne d'environ 1/25 000^e.

2.2.2. Résultats de la méthode de PREVENT

Sur le torrent des Arches, le chenal en amont du point situé à une distance de 1460 mètres de la plage de dépôt a une pente supérieure à 8°. C'est cette portion du chenal qui a été utilisée pour estimer le volume maximum d'un événement suivant la méthode que nous avons développée (PREVENT).

L'angle de prise de vue des photographies a rendu impossible la mesure précise des largeurs sur de nombreux profils en travers. Cette information a donc été obtenue en effectuant des mesures topographiques prises sur le terrain.

Au niveau de l'apex du cône de déjection, le chenal des Arches est constitué d'une zone particulière comportant un élargissement important (distance en amont de la plage de dépôt : de 1570m à 1917m). Dans la pratique, le service gestionnaire de la RTM utilise cette zone comme une pseudo plage de dépôt, légèrement désaxée en rive gauche. En effet, lorsque le torrent n'est pas en crue, tout est fait pour maintenir l'écoulement en rive droite afin d'éviter les divagations possibles dans cette zone. Pour les calculs de volumes, la morphologie du chenal en cet endroit a été prise en compte et la largeur excessive, pouvant atteindre soixante mètres, a été ramenée à vingt mètres correspondant à la largeur maximum sur le reste du chenal, car une lave torrentielle ne pourrait pas inciser les matériaux dans cette zone sur une largeur de soixante mètres.

Le volume estimé par la méthode de PREVENT est de 38 000 m^3 compris entre environ 17 500 m^3 et 58 000 m^3 en fonction des deux hypothèses de profils de référence, PLAN sup. et PLAN inf. (**Cf. Tab. 4-4**). C'est le volume maximum qu'une lave torrentielle aurait pu apporter à partir de juillet 1998.

Tableau 4-4
Volumes potentiels de matériaux accumulés dans le chenal des Arches de 1998 à 2001 et estimation du volume maximum transportable par une lave torrentielle selon la méthode de PREVENT (en gras)

Bassin versant en amont de :	Distance sur le profil en long à partir de la plage de dépôt aval	Hypothèse minimaliste	Hypothèse maximaliste	**Médiane**
Pseudo plage de dépôt	1 900 m	2 905	18 763	10 834
Chenal ayant une pente supérieure à 8% (**PREVENT**)	1 460 m	**17 483**	**57 811**	**37 647**
Plage de dépôt aval	0 m	-20 192	264 062	121 935

Les estimations d'erreur sont d'environ 12% pour le Manival et 11,7% pour le Merdarêt. Les calculs sur les Arches sont issus de 26 profils en travers. Pour ne pas minimiser l'erreur, nous avons utilisé l'estimation obtenue avec l'hypothèse maximaliste. La largeur moyenne de ces transects est de 14 mètres, avec une équidistance (longueur moyenne que chaque transect représente) est de 42 mètres. Nous avons trois types d'erreurs qui se cumulent :

- environ 4,5% pour une équidistance de 50 mètres entre les transects (**Cf. Fig. 2-33**),
- une erreur en écart-type de 27 cm sur les hauteurs moyennes des transects modélisés (**Cf. Fig. 2-32**), que l'on peut convertir en pourcentage sur le volume avec les caractéristiques de ce torrent en calculant l'erreur quadratique moyenne (**Cf. équation *2-12***) :

$$42 \times 14 \times 0{,}2 \times \sqrt{26} = 600 \text{ (en } m^3\text{)} \qquad (4\text{-}5)$$

$$\frac{600}{58\,000} = 0{,}0103 \text{ soit environ } 1\% \qquad (4\text{-}6)$$

- une erreur de mesure submétrique sur les photographies estimée avec quelques points fixes à un écart-type de 97 cm. Le même calcul peut alors être fait :

$$42 \times 14 \times 1 \times \sqrt{26} = 2998 \text{ (en } m^3\text{)} \qquad (4\text{-}7)$$

$$\frac{2\,998}{58\,000} = 0{,}0517 \text{ soit environ } 5{,}2\% \qquad (4\text{-}8)$$

L'erreur totale pour les Arches est donc de l'ordre de 10,7%, soit un volume d'environ 6 000 m^3. Là encore, ces erreurs liées aux mesures sont actuellement bien inférieures à l'incertitude des résultats due à la méthode (médiane de 38 000 m^3) utilisant les deux hypothèses, PLAN sup. et PLAN inf. (plus ou moins 20 000 m^3) qui s'élève ici à 53%.

La plus grande quantité de matériaux est stockée au niveau de l'élargissement particulier formant une pseudo plage de dépôt, c'est à dire au niveau de l'apex du cône de déjection à une distance allant de 1570 mètres à 1917 mètres par rapport à la plage de dépôt terminale (**Cf. Fig. 4-10**). Plus en amont, dans le bassin de réception, on remarque trois zones d'accumulations, en particulier vers une distance en amont de la plage de dépôt de 2000 mètres et de 2400 mètres où les biefs ont des stocks de matériaux supérieurs à 2 000 m^3. Ces dernières zones sont constituées de matériaux provenant de cônes d'éboulis. Enfin plus à l'aval du chenal, les pentes plus faibles (inférieures à 8°) favorisent les dépôts, ce qui explique les énormes quantités de sédiments stockés dans cette partie.

2.2.3. Zones de SPOTS du chenal

Comme pour les autres torrents nous avons localisé des zones de stockage temporaire à l'aide du graphique représentant les résidus du profil en long (**Cf. Fig. 4-8 C**). Après divers essais, il s'est avéré être le graphique montrant le mieux les principales ruptures de pentes du profil en long. Pourtant les zones de SPOTS restent assez difficiles à localiser et l'observation complémentaire sur le terrain est toujours très utile. Hormis dans le bassin de réception où l'on trouve quelques petites zones concaves dans le profil en long, deux larges zones concaves ont été cernées bien qu'elles soient entrecoupées de petites zones convexes. Bien sûr la plage de dépôt est une zone de SPOTS évidente. Même s'il ne revêt pas un caractère quantitatif, l'état des zones de SPOTS du chenal permet généralement d'affiner le résultat de la méthode de PREVENT: il peut donner un ordre d'idée de la probabilité d'obtenir le volume de matériaux maximum ou un volume plus faible, lors de la lave torrentielle à venir.

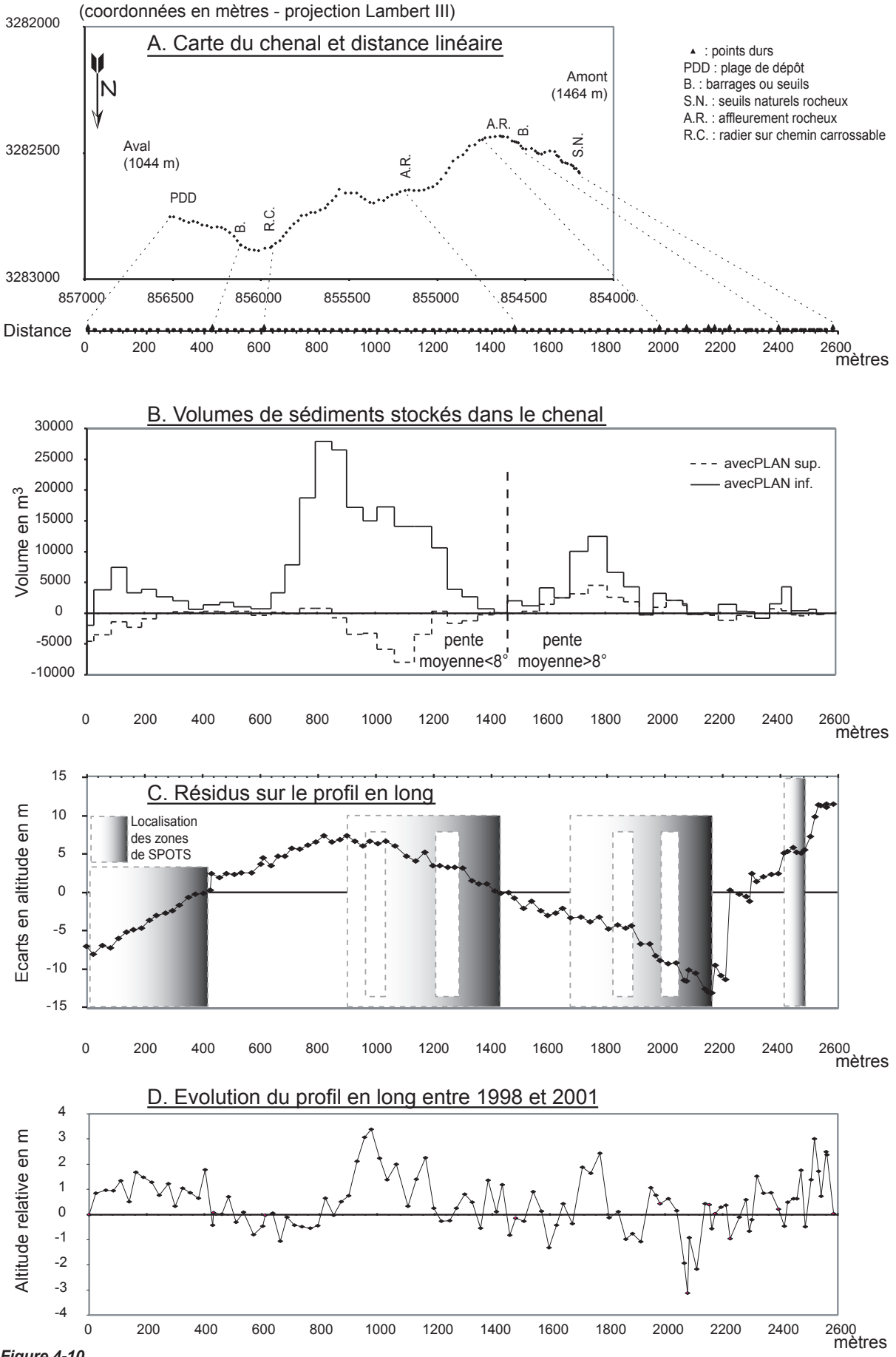


Figure 4-10
Analyse des mesures effectuées sur le torrent des Arches

3. Etude diachronique des événements contemporains sur les torrents étudiés

3.1. Torrent du Manival

3.1.1. Evénements récents depuis 1999

Comme nous l'avons vu lors de l'étude du torrent du Manival (Cf. troisième partie), aucun événement torrentiel d'importance n'a eu lieu depuis 1999, état prolongé par l'absence de précipitations orageuses dans le bassin de réception. Toutefois, le transport sédimentaire n'a pas été inactif du tout : la recharge sédimentaire provenant du versant (escarpement sommital) est restée forte (**Cf. Fig. 3-19**) et dans le chenal, plusieurs micro-laves torrentielles de volumes modestes se sont produites (**Cf. Fig. 3-42**). Le concept d'instabilité du système bassin versant proposé par Schumm [1973] s'adapte bien aux observations faites : au niveau du bassin étudié, cette période correspond à une phase de recharge sédimentaire du système qui n'a pas encore atteint le seuil limite de stabilité, et pendant laquelle aucun événement pluvieux assez important n'a pu le déstabiliser (**Cf. Fig 1-16**).

Ces petits événements de transport solide mettent en évidence que le cheminement des matériaux vers l'exutoire s'effectue sous forme de dépôt et de reprise dans le talweg. Divers auteurs ont déjà remarqué l'importance de ce phénomène dans la dynamique du transit des matériaux [Marutani *et al.*, 2001 ; Cannon *et al.*, 2003].

3.1.2. Etat des zones de SPOTS : un indicateur qualitatif

Durant la période récente, les micro-laves torrentielles se sont accumulées dans une zone de SPOTS située en amont du chenal, entre les barrages RTM n°10 et n°1 (**Cf. Fig. 3-45**). Les zones de SPOTS, caractérisées par une concavité vers le haut dans le profil en long, représentent un indicateur qualitatif fondamental de l'état sédimentaire du torrent. Les gestionnaires du service de la RTM l'ont compris de manière empirique depuis de nombreuses années : lorsque ces zones sont fortement chargées, elles sont généralement curées à la pelle mécanique. De même les plages de dépôt ne sont que des zones de SPOTS artificielles.

Les zones de SPOTS ont donc la capacité, lorsqu'elles sont vides, d'arrêter et de stocker le dépôt d'une lave torrentielle. Au Manival cela s'est passé à de nombreuses reprises, dans la plage de dépôt, mais aussi lors de l'événement de 1968 où une partie des matériaux transportés par la lave s'était déposée dans la zone n°4 (**Cf. Fig. 3-9**), près de la baraque forestière vers le barrage RTM n°30 (**Cf. Fig. 1-11**). A une échelle spatiale plus restreinte, les récentes micro-laves qui se sont déposées dans la zone n°1 (**Cf. Fig. 3-9**), représentent actuellement un volume disponible de l'ordre de 16 000 m^3 (entre 11 000 m^3 et 21 000 m^3) dans une zone peu accessible en amont du chenal.

En revanche, lorsqu'une zone de stockage temporaire est fortement chargée de sédiment, elle représente un volume de matériaux directement disponible pour nourrir une prochaine lave torrentielle. Pour ces dernières, ceci est vrai pour les zones où le chenal présente une pente supérieure à environ 8°. De plus il existe un risque de débordement et de contournement des ouvrages lorsque le chenal est rempli de matériaux, à l'exception des zones du chenal à très forte pente. Ainsi la zone n°1 (**Cf. Fig. 3-9**), représente actuellement un risque important pour la genèse d'une lave ou l'accroissement de son volume. En 1996, la zone n°4 (**Cf. Fig. 3-9**) qui était remplie de sédiments, a été curée avec une pelle mécanique pour éviter les risques de débordement et/ou surtout de reprise de matériaux par une lave torrentielle.

L'état de remplissage des zones de stockage temporaires du chenal est donc un indicateur qualitatif important pour les gestionnaires des risques torrentiels.

3.2. Torrent du Merdarêt

3.2.1. Evénement du 24 juillet 2000

A. Précipitations au cours de cet événement

Les précipitations à Bourg-d'oisans, situé à une dizaine de kilomètres du bassin versant du Merdarêt, n'ont pas été exceptionnelles au cours de cet événement. Le service de la RTM a enregistré un volume de précipitations de 46 mm en 5 heures, ce qui correspondrait à une période de retour de 6 ans [Koulinski, 2004]. Quant aux intensités maximales durant cet épisode, 33 mm/h ont été relevés sur une durée de 15 min, ce qui correspond à une période de retour inférieure à 2 ans.

B. Informations et les estimations du service de la RTM

A partir des documents du service de la RTM, en particulier la fiche événement et le sommier de la forêt, des discussions avec le technicien de secteur du service de la RTM, et des visites de terrain, nous avons essayé d'évaluer le volume transporté par la lave torrentielle du 24 juillet 2000.

Sur la fiche événement, le service de la RTM a noté des laves torrentielles importantes en forêt domaniale de Chantelouve, en particulier sur le Merdarêt et les Pâles avec plus de 20 000 m^3 dans les trois plages de dépôt (**Cf. Fig. 4-2**). Les dégâts suivants sont mentionnés : destruction de 2 barrages, endommagement de 28 autres, affouillements, route départementale 526 coupée au niveau du radier du Merdarêt. Plus en aval, à la confluence entre le Merdarêt et la Malsanne, des dépôts importants de l'ordre de 10 000 m^3 sont indiqués, avec la route départementale 526 impraticable sur 250 mètres durant 12 heures et la dégradation de deux hectares de prairies.

Dans son étude, Koulinski [2004, p.2] a écrit : "Près de 20 000 m³ ont été arrêtés par les plages de dépôt, le volume total transité durant la crue étant très vraisemblablement supérieur (environ 20 000 autres mètres cubes seraient arrivés dans la Malsanne)".

Le curage des trois plages de dépôt pour l'année 2000 se répartit de la manière suivante :

- Les Pâles : 8 500 m³
- Le Merdarêt amont : 0 m³ (Pas de curage après la lave torrentielle de 2000 ??)
- Le Merdarêt aval : 9 000 m³

Un volume de 17 500 m³ de matériaux aurait donc été extrait des plages de dépôt en 2000 ce qui ne correspond pas tout à fait aux observations reportées sur la fiche événement qui mentionne plus de 20 000 m³. Notons de plus que la plage de dépôt amont du Merdarêt (n°3) n'a pas été curée à la suite de cet événement important qui l'a certainement remplie.

On peut donc considérer que le volume estimé est de l'ordre de 20 000 m³ pour le bassin versant étudié.

C. Quantification du volume de l'événement à partir des mesures de terrain de l'été 2001 sur le Merdarêt.

En juillet 2001, nous avons effectué des mesures topographiques de terrain dans le chenal du Merdarêt. Les outils (télémètre laser et boussole électronique) et la méthode de mesure sont les mêmes que ceux exposés dans la seconde partie de cette thèse. Entre l'événement torrentiel de juillet 2000 et les mesures de l'été 2001, aucune crue n'a été recensée et les visites de terrain ne montrent pas de grosses variations de l'état sédimentaire du chenal.

Ces mesures de terrain ont permis d'établir un état sédimentaire quantifié du chenal. Ainsi pour le torrent du Merdarêt nous disposons de deux états du chenal, juste avant et juste après l'événement du 24 juillet 2000. La différence entre ces deux états en amont de la plage de dépôt n°1, proche de la route départementale donne un résultat d'environ 11 000 m³ (**Cf. Tab. 4-5**). Toutefois cette valeur ne représente pas tout à fait le volume de la lave torrentielle à cause de la gestion des plages de dépôt. En effet, dans le bassin de réception l'évolution sédimentaire du talweg principal est une reprise de plus de 4 000 m³, alors que dans la plage de dépôt à son exutoire (plage amont n°3) une accumulation de plus de 5 000 m³ a été mesurée. Le volume repris dans le talweg est sous-estimé car l'apport des ravins affluents remontant vers le sommet des Pâles n'a pas été pris en compte, mais la plus grande partie des matériaux transportés a certainement été stoppée par la plage de dépôt.

Entre les deux plages de dépôt, la crue est donc arrivée avec un certain déficit de charge solide qui explique une reprise importante des matériaux du chenal de plus de 9 000 m³ en amont de la confluence avec les Pâles. Pour l'ensemble de cette zone de chenal, plus de 14 000 m³ de matériaux ont composé la plus grande partie de la lave torrentielle (**Cf. Tab. 4-5**). L'incertitude liée à la méthode et aux outils de

Tableau 4-5
Estimation du volume de l'événement du 24 juillet 2000 sur le torrent du Merdarêt à partir des mesures topographiques (valeurs en m³)

Zone du chenal	Distance de la plage de dépôt	Juillet 2000			Juillet 2001			Différence entre les deux dates	Cumul sans les plages (**volume événement**)
		Hypoth. mini.	Hypoth. maxi.	Médiane	Hypoth. mini.	Hypoth. maxi.	Médiane		
Bassin de réception	1550-1900 m	3 923	9 344	**6 633**	-270	5 151	**2 441**	**-4 193**	-4 193
Plage de dépôt amont	1500-1550 m	-6 370	-619	**-3 494**	-1 091	4 660	**1 785**	5 279	---
De la plage amont à l'affluent des Pâles	870-1500 m	13 962	22 631	**18 297**	4 858	13 526	**9 192**	-9 105	-13 297
De l'affluent à la route départementale	275-870 m	8 169	32 691	**20 430**	2 966	27 488	**15 227**	-5 203	-18 501
Entre les deux plages de dépôt *	275-1500 m	22 131	55 322	38 727	7 823	41 014	24 419	**-14 308**	**-18 501**
Plage de dépôt aval	0-275 m	5 325	18 131	**11 728**	7 692	20 498	**14 095**	2 367	---
Total	0-1900 m	25 009	82 179	53 594	14 155	71 324	42 740	**-10 854**	

***** La marge d'erreur pour cette zone est d'environ $^{+}/_{-}$ 5 000 m³

	Etat en Juillet 2000	Curage de l'année 2000	Etat en Juillet 2001	Evolution (**volume événement**)
Plage de dépôt amont :	-3 494	0	1 785	5 279
Plage de dépôt aval :	11 728	9 000	14 095	11 367
			Total :	**16 646**

mesure, qui a été recalculée (**Cf. Fig. 2-12**, **2-32** et **2-33**) pour cette zone composée de 30 transects, est de l'ordre de 5 000 m³.

L'apport sédimentaire du torrent des Pâles a certainement été très limité puisque, de sa plage de dépôt, 8 500 m³ de matériaux ont été extraits, ce qui représente une recharge importante du bassin de réception des Pâles. Notons le curage de 7 000 m³ l'année précédente, qui laisse supposer que la plage était vide avant l'événement de juillet 2000. De plus des matériaux ont été stockés dans le chenal peu pentu la reliant au torrent du Merdarêt. Malgré quelques débordements, la passerelle enjambant le chenal des Pâles n'a pas été détruite (**Cf. Fig. 4-11**) alors que cela a été le cas pour celle du Merdarêt.

Tous les matériaux entraînés par la lave torrentielle n'ont pas été stoppés par la plage de dépôt aval puisque, en tenant compte du curage de 9 000 m³ de matériaux dans cette plage, seulement un peu plus de 11 000 m³ se sont déposés. Plusieurs milliers de mètres cubes ont donc continué à transiter dans le chenal aval en direction de la Malsanne.

La lave torrentielle du 24 juillet 2000 a donc été limitée par les plages de dépôt. Dans la partie amont correspondant au bassin de réception, le volume de matériaux transporté a été de l'ordre de 5 000 m³, peut-être un peu plus, alors qu'entre les deux plages de dépôt, le volume de sédiment mis en mouvement a été supérieur à 14 000 m³. Sachant que la plage de dépôt des Pâles était certainement remplie d'environ 8 500 m³, les résultats suggèrent que l'estimation provenant des informations du service de la RTM était un peu sous estimée. Le volume de matériaux de l'événement de juillet 2000 pour le bassin

Figure 4-11
Etat des passerelles enjambants le Merdarêt et les Pâles après les laves torrentielles de 2000 (essentiellement dans le Merdarêt) et de 2001 (essentiellement dans les Pâles) (Clichés S.V-C.)

étudié peut donc être estimé à plus de 27 500 m^3 au total et environ 19 000 m^3 si le torrent des Pâles n'est pas pris en compte.

3.2.2. Cohérence des résultats de la méthode de PREVENT

Pour le torrent du Merdarêt, le résultat de la méthode estimant le volume de matériaux d'un événement torrentiel maximal était d'un peu plus de 40 000 m^3 (de 20 000 m^3 à 64 000 m^3 en fonction des hypothèses de référence) (**Cf. Tab. 4-3**). L'estimation quantifiée à partir des mesures topographiques donne un résultat d'un peu moins de 20 000 m^3 pour la partie étudiée du torrent du Merdarêt.

Aux dires des agents du service de la RTM, cette crue était très importante pour le torrent du Merdarêt. Ils estiment qu'elle correspond à un événement de temps de retour 50 ans. Pour les laves torrentielles du Merdarêt, Koulinski [2004] propose dans son expertise un volume centennal d'environ 40 000 m^3 (entre 27 000 et 53 000 m^3) et un volume décennal de 15 000 m^3. Bien que ce genre de probabilité ne soit pas vraiment adapté à ce type de torrent, cela laisse à penser que la lave torrentielle était forte mais pas maximale. La méthode d'estimation est basée sur l'hypothèse que tous les matériaux disponibles sont repris par la lave torrentielle. Les valeurs que nous avons trouvées, pour ce cas d'étude idéal d'un seul événement, nous semblent cohérentes et représentent un début de validation de la méthode élaborée sur le torrent du Manival.

En 2001, logiquement, la méthode d'estimation pour un événement torrentiel maximal donne un volume beaucoup plus faible : environ 28 500 m³ (de 6 500 m³ à 51 000 m³). On peut s'attendre par la suite à une recharge du chenal et donc conseiller un suivi régulier de l'état de remplissage du chenal dans les années suivantes.

3.3. Torrent des Arches

3.3.1. Evénements contemporains de 1998 à 2001

Comme nous l'avons déjà signalé lors de la présentation du torrent des Arches, quatre événements se sont déroulés entre ces deux dates transportant plus de 26 000 m³ de matériaux. Rappelons que l'événement de 1998 estimé à 6 000 m³ n'a déposé que 3 000 m³ dans la plage de dépôt. Les 3 000 m³ déposés plus en amont ont certainement été repris par les laves torrentielles des années suivantes. Lors de la crue de septembre et octobre 2000 aucune estimation de volume précise n'a été faite. Le total au niveau de la plage de dépôt a donc été supérieur à 23 000 m³, correspondant à peu près aux 24 400 m³ de matériaux extraits durant ces même années (**Cf. Tab. 4-2**).

A partir des mesures topographiques de terrain que nous avons effectuées en juillet 2001, utilisant les mêmes outils (télémètre laser et boussole électronique) et méthodes que pour les autres torrents étudiés (**Cf. Partie 2**), la variation du volume sédimentaire du chenal des Arches a été calculée (**Cf. Tab. 4-6**). Sur l'ensemble de la zone étudiée, il y a eu un apport de plus de 14 000 m³, dont près de 8 000 m³ dans le chenal en amont de la plage de dépôt. Avec une cinquantaine de transects, les incertitudes sont de l'ordre de 8 000 m³.

Tableau 4-6
Estimation du volume sédimentaire du chenal de 1998 à 2001 sur le torrent des Arches à partir des mesures topographiques (valeurs en m³)

Zone du chenal	Distance de la plage de dépôt	Juillet 2000			Juillet 2001			Différence entre les deux dates	Cumul sans les plages (volume événements)
		Hypoth. mini.	Hypoth. maxi.	Médiane	Hypoth. mini.	Hypoth. maxi.	Médiane		
Bassin de réception	1930-2600 m	1 060	14 512	**7 786**	4 955	18 407	**11 681**	3 895	3 895
Pseudo plage de dépôt	1500-1930 m	16 329	43 204	**29 766**	16 335	43 211	**29 773**	7	3 902
Entre les deux plages de dépôt	430-1500 m	-25 279	184 637	**79 679**	-21 205	188 711	**83 753**	4 074	**7 976**
Plage de dépôt aval	0-430 m	-12 302	21 709	**4 704**	-6 099	27 912	**10 906**	6 204	**14 179**
Total	0-2600 m	-20 192	264 062	121 935	-6 013	278 241	136 114	**14 179**	

	Etat en Juillet 1998	Curage de 1998 à 2000 (**volume événements**)	Etat en Juillet 2001	Evolution
Plage de dépôt:	4 704	24 400	10 906	30 603
			Total chenal + plage de dépôt:	**38 579**

Environ 25 000 m^3 de matériaux apportés par les laves torrentielles ont été extraits de la plage de dépôt, ce qui signifie qu'il y a eu une recharge de l'ordre de 38 500 m^3 en trois ans, soit un apport d'un peu moins de 13 000 m^3/an. Avec une surface du bassin de réception de 1,36 km^2 d'où provient l'essentiel des matériaux, cela représente un taux d'érosion de l'ordre de 9,5 mm/an (à 2 mm près). Cette valeur reste indicative et doit être interprétée avec précaution, sachant qu'il s'agit d'une moyenne sur trois années seulement.

3.3.2. Objectivité des résultats de la méthode de PREVENT

Pour le torrent des Arches, le résultat de la méthode estimant le volume de matériaux d'un événement torrentiel maximal était de moins de 38 000 m^3 (de 17 500 m^3 à 58 000 m^3) (**Cf. Tab. 4-4**). D'autre part, bien qu'il n'y ait pas eu un événement maximal, le volume total des différentes laves torrentielles a été d'au moins 24 400 m^3.

Un volume aussi important de matériaux évacués vers l'aval (plage de dépôt) par des événements assez fréquents laisse à penser, *a priori*, que le niveau sédimentaire aurait dû diminuer. Or les résultats des mesures nous montrent le contraire car il y a eu une recharge importante dans le chenal qui peut être très difficile à évaluer lors d'une simple visite de terrain. Cette méthode de mesure adaptée aux torrents permet donc aux gestionnaires des risques torrentiels de suivre l'évolution de l'état sédimentaire de manière objective.

En 2001, la méthode d'estimation pour un événement torrentiel maximal fournit un volume légèrement supérieur à 1998, soit environ 41 000 m^3 (de 21 000 m^3 à 61 500 m^3).

4. Critique et perspective de la méthode de PREVENT

4.1. Apports de la méthode

4.1.1. Nouvelle approche globale basée sur des concepts adaptés au fonctionnement des systèmes torrentiels

A. Méthode rapide et simple

Il n'était pas envisageable d'étudier et de modéliser tous les processus géomorphologiques plus ou moins complexes du bassin versant ainsi que leurs interactions et le cheminement complet du transport solide. Ce travail aurait été très coûteux en moyens techniques, financiers et humains. De plus, la mise en place d'un modèle ou d'une méthode applicable à partir d'un telle étude aurait nécessité de nombreuses années.

C'est pourquoi la méthode que nous avons proposée ici s'inscrit dans une approche globale à l'échelle du bassin versant, qui ne permet pas de suivre exactement le cheminement des sédiments mais qui donne une estimation de la production sédimentaire d'ensemble du bassin. L'élaboration de ce type de méthode ou modèle s'est avéré beaucoup plus rapide.

Contrairement aux approches globales existantes dont nous avons parlé dans la première partie, qui conçoivent le fonctionnement interne du bassin versant comme une "boîte noire", la dynamique du stock sédimentaire a été le point central pour l'élaboration de la méthode de PREVENT.

B. Critères essentiels reflétant le fonctionnement du transport solide

L'objectif de notre travail a été de simplifier au maximum les mécanismes de fonctionnement de la dynamique du transport solide par l'utilisation d'un nombre très restreint d'indicateurs, sans pour autant avoir développé une méthode simpliste. Outre la robustesse de la méthode, cette simplification facilite également son utilisation par les praticiens.

En se basant sur le concept de stabilité sédimentaire (**Cf. Fig. 1-16**), nous avons concentré nos observations sur les phénomènes de dépôt et de reprise des sédiments, qui migrent vers l'aval de manière pulsatoire au gré des événements torrentiels, essentiellement les laves torrentielles majeures et les micro-laves. Dans les torrents, le chenal est l'endroit le plus sensible à ce phénomène car il met en jeu des volumes de matériaux importants mis à disposition des laves torrentielles. En effet, les laves se développent en fonction des matériaux accumulés dans le chenal. Ceci est particulièrement vrai sur les torrents que nous avons étudiés, mais a aussi été observé sur de nombreux autres torrents dans le monde [Lavigne, 1998 ; Marutani *et al.*, 2001 ; Cannon *et al.*, 2003].

Deux indicateurs essentiels ont finalement été retenus :

- l'estimation du volume maximum de matériaux du chenal disponible pour une lave torrentielle (PREVENT), indicateur quantitatif calculé à partir de mesures topographiques ;
- la localisation et l'état des zones de stockages temporaires (SPOTS) du chenal, indicateur qualitatif qui peut aider à estimer le risque d'occurrence, de déclenchement, de débordement, ou d'étalement d'une lave torrentielle.

Ainsi, notre méthode présente l'avantage d'être utilisable dans une autre région du monde, contrairement aux méthodes globales existantes qui sont en toute rigueur, du fait de leurs caractères empirique et statistique, asservies à la région où elles ont été élaborées.

4.1.2. Outils de mesure adaptés aux organismes torrentiels

A. Rapidité de mesure

Par la méthodologie d'échantillonnage développée spécifiquement pour les torrents (**Cf. Fig. 2-34**), un minimum de mesures, des transects constitués de quatre points équidistants de 30 à 50 mètres, permet d'évaluer de manière assez précise le stock sédimentaire du chenal. Pour un chenal de plus de 2 000 mètres de long, cela représente un total d'environ 400 points. Les mesures sur le terrain avec le télémètre laser et la boussole électronique peuvent être menées sur deux journées par deux personnes.

L'imprécision de ces mesures a été estimée, du fait de l'échantillonnage, à environ 6% du volume total calculé.

B. Qualité des données

Les mesures topographiques que nous avons utilisées, qu'elles soient effectuées sur des photographies aériennes ou sur le terrain, sont les plus fiables et objectives. Les incertitudes liées à l'utilisation de la mémoire subjective des personnes (enquêtes, archives écrites) ou des sources de données ayant des échelles inadaptées comme les cartes régionales (géologiques, de végétation, etc.) ont ainsi été évitées.

Pour constituer une base de donnée historique, nous avons utilisé des photographies aériennes d'archives remontant jusqu'aux années soixante, de moins bonne qualité que des prises de vue contemporaines et avec des échelles plus petites allant jusqu'au 1/30 000^{e}. Ces contraintes n'influencent pas la fiabilité et l'objectivité des données, mais seulement leur précision. Celle-ci peut ainsi être augmentée d'environ 8% du volume calculé, ce qui porte l'incertitude totale maximale à 15% du volume en prenant en compte les erreurs liées à la méthodologie de mesure. Bien entendu cette marge d'erreur est approximative, calculée pour un torrent type comme celui du Manival (en amont de la plage de dépôt). En effet les

erreurs sont exprimées en pourcentage par rapport au volume total de sédiment pour faciliter leur prise en compte globale, mais en réalité elles s'appliquent le plus souvent aux altitudes des points de mesure de la topographie de surface. Dans certains cas, le pourcentage, pour une même erreur sur l'altitude, pourrait alors varier en fonction du volume, donc de la profondeur et par conséquent de l'altitude du niveau de référence. Par exemple une erreur de 50 centimètres sur une profondeur de 10 mètres représente 5%, alors que sur une profondeur d'un mètre seulement elle est de 50%.

La photogrammétrie est une très bonne alternative aux mesures de terrain pour l'étude rétrospective des torrents car elle permet :

- des mesures sur des photographies anciennes, pouvant souvent remonter aux années 1940 ou 1950, ce qui permet de dresser des états sédimentaires passés,
- des mesures dans des zones torrentielles inaccessibles ou trop dangereuses,
- éventuellement une alternative économique (**Cf. Tab. 4-7**) en fonction des moyens humains et matériels disponibles.

Tableau 4-7
Prix indicatifs pour le traitement par mesures photogrammétriques d'un chenal torrentiel effectué par un cabinet de géomètres-experts

Opération	Prix unitaire estimé	Nombre nécessaire	Prix en euros
Prise de vue aérienne	1 500 à 4 000	1	1 500 à 4 000
Mesure de point d'appui sur le terrain	50 à 80	6 à 10	300 à 800
Sous-total 1			1 800 à 4 800
Mesure de profil en long par photogrammétrie	100	1	100
Mesure de profil en travers par photogrammétrie	30	50 à 70	1 500 à 2 100
Sous-total 2			1 600 à 2 200
Numérisation de prise de vue d'archive	30 à 50	2 à 3	60 à 150
Calage à partir de points d'appui pris sur une carte	100 à 150	1	100 à 150
Sous-total 3			160 à 300
Total à partir de prises de vues aériennes à grande échelle	Sous-total 1 + 2		3 400 à 7 000 €
Total à partir de prises de vues d'archives	Sous-total 2 + 3		1 760 à 2 500 €

4.1.3. Perspectives méthodologiques d'une méthode évolutive

L'approche étant radicalement différente par rapport aux autres méthodes ou modèles existants, la méthode proposée dans son état actuel peut évoluer pour qu'elle soit applicable à de nombreux types de torrents d'une part, et pour améliorer la précision des estimations par une meilleure compréhension du fonctionnement de la dynamique sédimentaire d'autre part.

La méthode a été développée sur un type de torrent, dit "à clappe", qui est caractérisé par un apport principal des matériaux provenant de barres rocheuses en tête de bassin versant. Les sédiments sont donc stockés dans le chenal avant d'être repris et transportés par les laves torrentielles. Du fait de son schéma d'élaboration, cette méthode peut être adaptée à d'autres types de torrent, différenciés en fonction de leur fonctionnement sédimentaire et du type de déclenchement des laves torrentielles, car dans la plupart des cas, la recharge sédimentaire du chenal et la reprise des matériaux par une lave dans celui-ci n'est pas concomitante. L'exception la plus courante se produit dans les torrents

où la source sédimentaire est un grand glissement de terrain mis en mouvement dans le versant ; il arrive fréquemment que cet apport de matériaux conséquent, une fois dans le chenal, poursuive immédiatement son cheminement vers l'aval sous forme de lave torrentielle. Ce cas a été volontairement éliminé de notre étude, car il met en œuvre deux processus qui se relaient, ayant une dynamique propre et très différente l'une de l'autre. Pour contourner cette difficulté, il est alors possible d'adapter notre méthode en faisant des scénarios qui intègrent le volume sédimentaire du glissement pouvant arriver dans le chenal. L'utilisation de scénarios peut également être développée dans des cas impliquant une recharge sédimentaire exceptionnelle du chenal : lors d'apports latéraux dans les secteurs où les berges sont facilement déstabilisées (sapements de pieds de versants) ce qui est assez fréquent lorsque le profil en long du chenal n'est pas stabilisé par exemple, ou encore pour des apports imprévus comme la rupture d'un barrage de correction torrentielle.

Dans cette étude, nous nous sommes focalisés sur le transport des matériaux par lave torrentielle car dans les Alpes du nord françaises, c'est sans aucun doute le mode de transport torrentiel le plus préoccupant principalement à cause des forts volumes de matériaux transportés et des dégâts qu'ils engendrent, mais aussi parce qu'il est actuellement plus difficile de prévoir ces volumes. Cependant, certains torrents peuvent aussi évacuer de grandes quantités de matériaux en les transportant par charriage. La méthode, par son approche globale, peut facilement être adaptée au charriage en utilisant les études déjà menées sur ce type de transport comme le calcul de la capacité maximale de transport par charriage, la spécificité d'application aux laves torrentielles ne résidant que dans la pente globale limite et le profil de base étudié.

L'estimation du volume (PREVENT) est actuellement faite pour un événement maximum qui reprendrait l'ensemble des matériaux accumulés dans le chenal, sur toute sa longueur (pentes supérieures à 8°). L'étude de nombreux torrents permettrait d'affiner cette estimation en proposant une probabilité quantifiée de l'aléa en fonction de l'état sédimentaire des zones de SPOTS. Ce type de probabilité serait bien plus adapté que les temps de retour, calculés à l'origine pour l'hydrologie, proposés actuellement aux gestionnaires. En effet ces temps de retour reflètent une probabilité d'occurrence directement liée aux précipitations, mais indépendante de la dynamique sédimentaire interne du chenal torrentiel. Or si des précipitations rares et importantes surviennent un jour, il existe la même probabilité qu'elles apparaissent à nouveau le lendemain, alors que si une lave torrentielle évacue vers l'aval l'ensemble des matériaux stockés dans le chenal, le même type d'événement ne pourra survenir qu'après une recharge sédimentaire de celui-ci. Les crues de 2000 et de 2001 sur le torrent du Merdarêt illustrent bien ces propos : alors que la crue n'a été importante que sur le Merdarêt en 2000, c'est uniquement sur les Pâles qu'elle a été forte en 2001.

4.2. Limites de la méthode

4.2.1. Utilisation limitée à certain types de torrents

Parmi les deux grands types de torrent dont nous avons parlé dans la première partie (**Cf. Fig. 1-17**), la méthode proposée ne s'applique qu'aux torrents où l'occurrence des laves torrentielles est fonction d'un seuil géomorphologique intrinsèque (weathering-limited system with supply-limited). L'autre type, seuil extrinsèque hydrométéorologique (transport-limited system with supply-unlimited), est directement corrélé aux précipitations en fonction du type, de la durée, de l'intensité de ces dernières. Les études en cours autour du volcan Semeru sur l'île de Java en Indonésie, où les différentes influences météorologiques sont plus faciles à observer, montrent en partie cette corrélation [Lavigne et Suwa, 2004].

A l'intérieur de ce cadre d'application, nous n'avons étudié que des torrents dit "à clappes" situés en Isère dans les Alpes-du-Nord françaises, et constitués d'une lithologie assez similaire entre eux alternant des couches tendres, schisteuses ou marneuses, avec des couches plus dures, à dominante calcaire. Mais comme nous l'avons expliqué au paragraphe précédent, l'adaptation à d'autres torrents ne devrait pas poser de problèmes particuliers, du moment qu'ils se trouvent dans le groupe ayant un seuil géomorphologique intrinsèque.

4.2.2. Incertitude liée à la méconnaissance du niveau PLAN de référence

Le point faible actuel de la méthode est sans aucun doute l'incertitude du niveau d'érosion maximum d'une lave torrentielle. Bien que l'étude du niveau le plus bas observé sur le torrent du Manival à partir des différents états sédimentaires mesurés sur les photographies aériennes d'archives (**Cf. Fig. 2-26**), semble montrer que le niveau réel se situerait bien entre les deux profils de référence utilisés (PLAN sup. et PLAN inf.), ces mesures ne suffisent pas pour localiser précisément le niveau de base recherché.

La connaissance précise de ce niveau de base permettrait de passer directement d'une incertitude sur les volumes qui peut atteindre plus de 50% lorsque le volume total n'est pas très élevé, à environ 7%. Pour l'améliorer, deux type d'études sont envisageables :

- l'observation des niveaux les plus bas du profil en long à partir d'une importante base de données des états sédimentaires de chenaux torrentiels. Le grand nombre de PLAN en particulier lorsque ceux-ci sont mesurés juste après une lave torrentielle permettrait de mieux connaître la forme et le niveau d'ablation réels entre deux points durs dans le profil en long du chenal ;
- l'étude en canal artificiel de l'érosion des laves torrentielles, permettent d'observer et de mesurer l'ablation maximale en fond de chenal.

4.3. Evolution vers un modèle

La méthode d'estimation proposée ici constitue déjà une modélisation, relativement simple mais débouchant sur des possibilités de quantification. L'intérêt de la méthode de PREVENT pour les gestionnaires des risques torrentiels est que la qualité des résultats est fiable (même s'ils ne sont pas encore très précis), de plus le modèle est relativement simple à utiliser et rapide à mettre en place.

L'amélioration pour une utilisation encore plus simple serait de développer une interface informatique permettant l'automatisation totale des calculs, sachant qu'actuellement plusieurs *macro-commandes* développées en *Visual Basic* les rendent déjà semi-automatiques. L'acquisition directe des données topographiques à partir de différents outils de mesures (GPS, Télémètre, restituteur photogrammétrique,…) peut être imaginée.

L'intégration de cette méthode d'estimation dans un cadre plus large comme le logiciel ETC (Erosion des Torrents en Crue) développé par le Cemagref de Grenoble pour fournir un outil aux gestionnaires paraît tout indiquée. Ce logiciel qui décompose le bassin versant torrentiel en zones fonctionnelles dans les versants et en tronçons homogènes dans le chenal, permet d'intégrer différents modèles d'érosion et/ou de transport qui peuvent se relayer, afin d'avoir une vision globale du fonctionnement du bassin. Pour améliorer cet outil en traitant indifféremment dans le temps et l'espace les différents modes de transports torrentiels (lave et/ou charriage), on pourrait développer le calcul de la puissance de ces derniers, un indicateur fréquemment utilisé en géomorphologie fluviale. En effet la puissance permet de traduire l'énergie développée par l'événement quel que soit son mode de transport et par là même, de déterminer sa capacité érosive en fonction du stock sédimentaire disponible.

Conclusion générale :

Rappelons brièvement que lorsque nous avons démarré ce travail de recherche, nous avons pu constater qu'il n'existait pas de méthode fiable à disposition des praticiens pour estimer les volumes de laves torrentielles, tout au moins en France. Les gestionnaires du service de la RTM s'appuient essentiellement sur leur connaissance empirique de terrain. En effet, dès la fin du XIX^{ème} siècle, certains forestiers français décrivaient déjà très bien le fonctionnement des laves torrentielles. Bien que la gestion des torrents ait été menée globalement avec succès depuis plus d'un siècle, les gestionnaires en charge des risques torrentiels aimeraient bien disposer d'une méthode fiable leur permettant d'estimer les volumes maximums de matériaux qu'un torrent peut transporter jusqu'à son exutoire. Dans une société qui a de plus en plus de mal à accepter les risques, l'utilisation d'une méthode reconnue serait une garantie supplémentaire dans le choix de gestion des praticiens qui engagent leur responsabilité. Dans les Alpes du Nord françaises, les crues torrentielles les plus dévastatrices sont celles qui s'écoulent sous forme de laves ; or, on ne dispose pas pour ce type d'écoulement de modèle ou de formules hydrauliques permettant d'estimer les débits ou les volumes transportés. Nous nous sommes donc plus particulièrement intéressés aux laves torrentielles.

Contrairement aux crues des rivières, le déclenchement des laves torrentielles n'est pas toujours fonction des précipitations, auquel cas il serait possible d'utiliser des formules hydrologiques. Dans l'ensemble, les corrélations entre précipitations et événements torrentiels ne sont pas très bonnes, en grande partie parce que l'occurrence de ces derniers peut être fortement liée à la fourniture de matériaux détritiques disponibles (surtout pour les laves torrentielles). Le domaine de validité de notre travail est donc restreint aux cas les plus complexes des torrents ayant un seuil intrinsèque lié à la recharge sédimentaire (**Cf. Fig. 1-17**), pour lesquels nous avons actuellement le moins d'outils de prédiction disponible. En s'appuyant sur le schéma de fonctionnement conceptuel (**Cf. Fig. 1-16**) proposé par Schumm [Schumm, 1973], on comprend bien le rôle prépondérant de la recharge en matériaux entraînant une rupture de stabilité, matérialisée par la crue. C'est sur cette base que nous avons entrepris d'étudier le fonctionnement de la dynamique sédimentaire au sein du bassin versant torrentiel.

Il s'est rapidement avéré que la zone-clé régissant les laves torrentielles était le chenal et son état de remplissage sédimentaire. Pour le mesurer, nous avons développé une méthodologie de mesure adaptée au chenal. Ainsi l'état de remplissage sédimentaire d'un torrent peut être calculé à partir d'environ 400 points de mesure topographique seulement, répartis selon des profils en travers équidistants (**Cf. Fig. 2-34**). Le remplissage du chenal en sédiments est déterminé par le volume compris entre la topographie de surface et un niveau de fond correspondant au niveau d'ablation maximal lors d'un événement majeur. Si la topographie est facilement mesurable avec des outils et une méthodologie adaptés, il est beaucoup plus délicat de connaître le niveau d'ablation maximal. C'est pourquoi, dans notre travail, nous avons défini deux hypothèses d'ablation du profil en long dont le niveau est maintenu par les points durs formés de seuils rocheux naturels ou de barrages artificiels de correction torrentielle : l'altitude

du fond a été estimée par l'altitude de deux profils, PLAN sup. (Profil en Long d'Ablation de Niveau supérieur) et PLAN inf. (Profil en Long d'Ablation de Niveau inférieur), qui encadrent l'altitude réelle (**Cf. Fig. 2-23**). Le volume total accumulé dans le chenal est finalement calculé en additionnant des casiers sédimentaires pour lesquels les profils en travers sont représentatifs. Au niveau de chacun de ces transects, le niveau d'ablation maximum a été matérialisé par le PTA (Profil en Travers d'Ablation), délimité par des verticales au niveau de chaque berge et du PLAN au fond (**Cf. Fig. 2-22**).

Pour déterminer les indicateurs à utiliser dans la méthode d'estimation du volume de lave torrentielle proposée, nous avons étudié en détail la dynamique sédimentaire d'un torrent, le Manival. Ce torrent a été choisi en grande partie parce qu'il était le sujet de nombreux documents d'archives liés au suivi par le service de la RTM depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Certes, ces données sont insuffisantes, mais tout de même importantes pour valider ou invalider certains de nos résultats. Pour avoir une source de données la plus fiable et la plus exhaustive possible, nous nous sommes tournés vers l'utilisation de photographies aériennes. En utilisant la technique de stéréophotogrammétrie (**Cf. Fig. 2-1** à **2-12**) sur les photographies aériennes d'archives disponibles, l'état de remplissage du chenal a été calculé pour douze dates (de 1963 à 2000) avec une précision altitudinale en écart-type submétrique. Cette analyse diachronique a permis d'établir des bilans sédimentaires (**Cf. Fig. 3-31**). Dans l'étude détaillée du bassin versant du Manival, ces bilans ont été complétés par des approches à différentes échelles :

- une cartographie fonctionnelle permettant de définir les principales zones de recharge sédimentaire du chenal (**Cf. Fig. 3-15**),
- un suivi du haut-ravin du Manival fonctionnant à un rythme plus rapide que le chenal aval (**Cf. Fig. 3-19**),
- des observations de terrain (**Cf. Fig. 3-42**),
- l'influence des facteurs hydrométéorologiques (**Cf. Fig. 3-19** à **3-27** et **3-34** à **3-41**).

Ce travail nous a permis de comprendre la dynamique sédimentaire du bassin versant torrentiel, et de discriminer un indicateur reflétant le fonctionnement torrentiel. En terme de transit sédimentaire dans la formation et l'écoulement des laves torrentielles, la pente constitue cet indicateur essentiel (**Cf. Fig. 3-29**). Elle revêt toutefois plusieurs significations que nous avons traduites par deux indices :

- La méthode de PREVENT (PREdiction du Volume de l'EvéNement Torrentiel), est un indice quantitatif utilisant la pente globale (>8°) qui indique le volume maximum des matériaux qu'une lave torrentielle pourrait apporter (**Cf. Tab. 3-7**) ;
- L'état des zones de SPOTS (Stockage POtentiel Temporaire de Sédiment) du chenal est un indice qualitatif utilisant la rupture de pente locale qui, en complément de la méthode de PREVENT, permet d'estimer la probabilité qu'un événement majeur se produise (**Cf. Fig. 3-43**).

Après l'application de la méthode de PREVENT sur deux autres torrents, en particulier celui du Merdarêt où un seul événement de forte amplitude a été étudié, les résultats montrent une bonne cohérence même si la méthode reste à valider sur un plus grand nombre de torrents. L'avantage principal de cette méthode globale basée sur des concepts géomorphologiques est la possibilité de la faire évoluer pour

l'utiliser à la fois dans d'autres régions du monde, sur d'autres types de torrents (lithologie différente), ou sur des torrents à écoulements mixtes mêlant charriage et lave torrentielle. Les mesures topographiques, sur le terrain ou sur photographies, rendent la source des données particulièrement fiable. Par contre la principale limite actuelle de la méthode réside dans l'incertitude lié au PLAN, qui peut engendrer des écarts sur la valeur médiane, entre le PLAN sup. et le PLAN inf., allant jusqu'à plus ou moins 50% du volume total si celui-ci n'est pas très élevé (elle est d'environ 25% pour le Manival). Les erreurs liées à la méthodologie et aux mesures sont beaucoup plus faibles : de l'ordre de 7% du volume total pour des mesures de terrain et de 15% du volume total avec des mesures photogrammétriques sur des photographies d'archives.

Ce travail de recherche appliquée est une contribution au service des gestionnaires tant par l'apport d'outils méthodologiques permettant d'effectuer des mesures optimales, que par l'apport d'outils théoriques offrant une estimation de l'aléa torrentiel. La topographie est le domaine de mesure qui a été privilégié. Les deux outils que nous avons utilisés nous semblent bien adaptés aux entités spécifiques que sont les torrents. Il s'agit de la photogrammétrie sur des photographies aériennes d'une part, et de la topographie de terrain d'autre part. Chacun de ces outils présente des avantages qui seront plus ou moins bien valorisés en fonction de la politique et des moyens des différents services gestionnaires. La topographie de terrain, par exemple, permettra à une équipe de deux personnes de parcourir un chenal torrentiel en deux ou trois jours avec du matériel de mesure léger. Cette technique peut être avantageuse pour un organisme ayant suffisamment de personnel aguerri au terrain torrentiel. La photogrammétrie permet quant à elle, de diminuer grandement le temps nécessaire passé sur le terrain. Malgré son coût qui, au premier abord, peut paraître élevé (**Cf. Tab. 4-7**), cette technique permet des études rétrospectives sur certains torrents, comme nous l'avons fait pour le Manival, ou encore des mesures de torrents inaccessibles ou trop dangereux. Il serait très intéressant de mettre en place des missions de photographies aériennes régulières qui permettrait un suivi précis d'un panel de torrents pour gérer le risque et affiner la connaissance de l'aléa. Quoi qu'il en soit, la première étape est d'effectuer une mesure de la topographie de surface du chenal torrentiel. Associée à l'expertise des points durs dans le profil en long (seuils naturels ou barrages de correction torrentielle), elle permet d'utiliser la méthode de PREVENT, dont les étapes principales sont reprises en annexe, pour prédire le volume de matériaux maximum que pourrait apporter une lave torrentielle. Enfin, l'état des zones de SPOTS du chenal est une information importante pour affiner la valeur trouvée par la méthode de PREVENT : en effet, si les zones de SPOTS du chenal sont vides, elles peuvent avoir la capacité de contenir tout ou partie de la lave torrentielle, alors que si elles sont pleines, elles auront l'effet inverse c'est-à-dire engendreront un risque accru de voir la lave grossir au maximum et d'atteindre éventuellement la valeur prédite par la méthode de PREVENT. Il faut garder à l'esprit que, pour ce type de torrent (**Cf. Fig. 1-17**), c'est le degré de remplissage sédimentaire du chenal qui va déterminer le volume de la lave torrentielle. Cela implique une adaptation des observations et des mesures aux rythmes de remplissage et de vidange du torrent, au gré des événements majeurs mais aussi des mouvements de matériaux de faible ampleur qui surviennent beaucoup plus fréquemment. Une visite de terrain annuelle, s'appuyant sur des repères

précis le long du chenal et sur des photographies, devrait permettre de déterminer la fréquence de mesure adaptée à chaque torrent (qui peut aussi s'avérer variable dans le temps!).

Les praticiens trouveront, nous l'espérons, dans cette méthode simple et assez rapide une réponse à leur attente d'un outil d'aide à la gestion des risques torrentiels. Une fois le volume potentiel d'une lave torrentielle majeure connu, il est possible de coupler cette information avec d'autres modèles comme par exemple un modèle numérique d'étalement, ou d'autres scénarios, afin d'effectuer des travaux de protection adéquats ou des zonages spécifiques. S'ils s'approprient la méthode de PREVENT, celle-ci pourra certainement évoluer vers une interface informatique, rendant les calculs totalement automatiques.

BIBLIOGRAPHIE

Nombre de références bibliographiques : 427

Al-garni, A.M., 1996. Urban photogrammetric data base for multi-purpose cadastral-based information systems: the Riyadh city case. Journal of Photogrammetry and Remote sensing, 51: 28-38.

Allard, P., 2000. Eléments pour une problématique de l'histoire du risque. Du risque accepté au risque maîtrisé. Représentations et gestion du risque d'inondation en Camargue, XVIIIe-XIXe siècles. Mémoire pour l'Habilitation à la Direction de Recherches, Université Méditerranée-Aix, 177 p.

Allée, P., 1997. Rythmes saisonniers et annuel du ravinement sur les hautes terres granitiques cévenoles. L'exemple de la ravine de l'Aubaret (Mont Lozère, France), Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne (conference proceedings), Digne, pp. 119-128.

Amoros, C. et Petts, G.E., 1993. Hydrosystèmes fluviaux. Masson, Paris, 300 p.

Ancey, C., 1999. Rhéologie des laves torrentielles (rapport), Toraval, 33 p.

Ancherri, L., 1966. Les crues du torrent de Pontamafrey en 1965. Revue de Géographie Alpine, 54: 15-42.

Antoine, J.-M., 1988. Un torrent oublié mais catastrophique en Haute-Ariège. Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, 59(1): 73-88.

Arattano, M., 2003. Monitoring the presence of the debris-flow front and its velocity through ground vibration detectors. In: R. Dieter et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress, Davos, pp. 719-730.

Arguden, A.T., Umbal, J.V. et Rodolfo, K.S., 1989. 15 November 1987 typhoon triggered lahar on Mayon volcano, Philippines., Proceedings Kagoshima International Conference on Volcanoes (conference proceedings), Kagoshima, pp. 654-657.

Ashida, K., Egahira, S. et Ando, 1984. Generation and Geometric Features of step-pool bed forms. N°27B-2 (rapport), Disaster Prevention Research Institut, Kyoto university.

Ashworth, P.J. et Ferguson, R.I., 1986. Interrelationships of channel processes, changes and sediments in a proglacial braided river. Geografisca Annaler, 68A: 361-371.

Astrade, L., 2003. Utilisation de la dendrochronologie comme outil de diagnostic et d'évaluation du fonctionnement des hydrosystèmes. In: Les forêts riveraines des cours d'eau, écologie, fonctions et gestion, H. Piégay, G. Pautou et C. Ruffinoni (Editors), Institut pour le Développement Forestier, pp. 204-216.

Aulitzky, H., 1982. Preliminary two-fold classification of torrents, Essais sur la Recherche d'Erosion Torrentielles et des Avalanches (conference proceedings), Wien, pp. 243-256.

Azimi, C. et Devarreux, P., 1974. A study of one special type of mudflow in the french Alps. Q. J. Eng. Geol., 7: 329-338.

Baillard, C., Dissard, O., Jamet, O. et Maître, H., 1998. Extraction and textural characterization of above-ground areas from aerial stereo pairs: a quality assessment. Journal of Photogrammetry and Remote sensing, 53: 130-141.

Ballandras, S., 1997. Contribution à l'étude des bassins-versants torrentiels alpins. Stratigraphies, morphodynamique, paléoenvironnements, de bassins-versants depuis 15000 BP. Thèse de Doctorat, Université Savoie, Chambéry, 552 p.

Band, L.E., 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. Water Ressource Research, 22: 15-24.

Bardou, E., 2002. Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 188 p.

Barféty, J.C. et al. (Editors), 2000a. Notice explicative de la carte géologique de la France (1/50000), feuille de Domène (773). BRGM, Orléans, 187 p.

Barféty, J.C. et al., 2000b. Carte géologique de la France (1/50000), feuille de Domène (773). BRGM, Orléans, pp. 187.

Barker, R., Dixon, L. et Hooke, J., 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and leasuring bank erosion. Earth Surface Processes and Landforms, 22: 1217-1227.

Batalla, R.J., De Jong, C., Ergenzinger, P. et Sala, M., 1999. Field observations on hyperconcentrated flows in moutain torrents. Earth Surface Processes and Landforms, 24: 247-253.

Battany, M.C. et Grismer, M.E., 2000. Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards: effects of slope, cover and surface roughness. Hydrological Processes, 14: 1289-1304.

Beaty, C.B., 1989. Great big boulders I have known. Geology, 17: 349-352.

Benda, L., 1990. The influence of debris flows on channels and valley floors in Oregon Coast Range, USA. Earth Surface Processes and Landforms, 15: 457-466.

Benda, L. et Dunne, T., 1987. Sediment routing by debris flow. In: R.L. Beschta, T. Blinn, G.E. Grant, G.G. Ice et F.J. Swanson (editors), Erosion and sédimentation in the pacific Rim (conference proceedings). IAHS, pp. 213-223.

Bénévent, M.E., 1915. Le Manival, Etude de cône de déjection. Revue de Géographie Alpine, Volume 3 n°1: 69-100.

Bernard-Allée, P. et Cosandey, C., 1991. Conséquence d'une coupe forestière sur les bilans hydrologique et sédimentaire: le bassin versant de la Latte, Mont Lozère. Physio-Géo, 21: 79-94.

Besson, L., 1996. Les risques naturels en montagne, Artès-publialp, 438 p.

Betts, H.D., Trustrum, N.A. et De Rose, R.C., 2003. Geomorphic changes in a complex gully system measured from sequential digital elevation models, and implications for management. Earth Surface Processes and Landforms, 28(10): 1043-1058.

Bingham, E.C. et Green, H., 1919. Paint, a plastic material and not a viscous liquid: the measurement of its mobility and yield value. Proc. Am. Soc. Test. Mater., 19: 640-664.

Blanc, P. et Perrard, S., 1998. Grenoble, un siècle de photographies (1900-2000), Didier Richard, 127 p.

Blanc, X., Pinteur, F. et Sanchis, T., 1989. Conséquences de l'enfoncement du lit de l'Arve sur les berges et les ouvrages. Bilan général des transports solides sur le cours d'eau. La Houille Blanche(3-4): 226-230.

Blijenberg, H., 1998. Rolling stones? Triggering and frequency of hillslope debris flows in the Bachelard valley, Southern French Alps. Thèse de Doctorat, Université Utrecht, Utrecht, 223 p.

Bonnet-Staub, I., 1998. Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes Françaises, Contribution à la maîtrise du risque. Doctorat, Ecole des Mines, Paris, 237 p.

Borges, A.L.d.O., 1993. Modélisation de l'érosion sur deux bassin versants expérimentaux des Alpes du Sud, Université Université Joseph Fourier Grenoble I, Grenoble, 205 p.

Boussarsar, B., 1987. Torrentialité et avalanches dans une forêt des Pyrénées centrales: le Laou d'Esbas. Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, 58(1): 63-80.

Bovis, M.J. et Dagg, B.R., 1987. Mechanisms of debris supply to steep channels along Howe Sound, southwestern British Colombia. In: R.L. Beschta, T. Blinn, G.E. Grant, G.G. Ice et F.J. Swanson (editors), Erosion and sedimentation in the Pacific Rim (conference proceedings). IAHS, pp. 191-200.

Bovis, M.J. et Jakob, M., 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. Earth Surface Processes and Landforms, 24: 1039-1054.

Brasington, J., Langham, J. et Rumsby, B., 2003. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. Geomorphology, 53: 299-316.

Bravard, J.P., 1989. La métamorphose des rivières des Alpes françaises à la fin du Moyen-Age et à l'époque moderne. Bulletin de la Société Géographique de Liège, 25: 145-157.

Bravard, J.P., Kondolf, G.M. et Piégay, H., 1999. Environmental and societal effects of channel incision and remedial strategies. In: Incised River Channels, S.E. Darby et A. Simon (Editors), John Wiley and Sons, pp. 301-341.

Bravard, J.P. et Petit, F., 1997. Les Cours d'eau. Masson & Armand Colin, Paris, 222 p.

Brecher, H.H., 1986. Surface velocity determination on large polar glaciers by aerial photogrammetry. Annals of Glaciology, 8: 22-26.

British Colombia, G., 1997. Hummingbird Creek debris event - July 11, 1997 - Inter-agency report, http://www.elp.gov.bc.ca/sir/wat/humbird/hbfinal.html, accédé le 23/12/98.

Brochot, S., 1991. Torrent du Manival. Etude préalable à l'aménagement (rapport), Cemagref / RTM / SITSE, Grenoble, 26 p.

Brochot, S., 1993. Erosion de badlands dans le système Durance-Etang de Berre (rapport), Cemagref - Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, Grenoble, 7 fascicules.

Brochot, S., 1998. Etude hydraulique de l'Arc de Maurienne de Modane à l'Isère. Estimation des apports sédimentaires des torrents affluents (rapport), Cémagref, Grenoble, 52 p & annexes.

Brochot, S., Coeur, D., Lang, M. et Naulet, R., 2000a. Historisque-Isère et torrents affluents. Utilisation de l'information historique pour une meilleur définition du risque d'inondation (rapport), Cemagref / Achtys, Lyon - Grenoble, 248 p.

Brochot, S., Laigle, D. et Bianco, G., 2000b. Mise en commun des méthodes et des connaissances sur les processus des laves torrentielles. Connection des réseaux de données et mise en commun des connaissances et des expériences pour la gestion des risques d'inondations en région alpine (rapport), European program Interreg II, France - Italie, 135-176 p.

Brochot, S., Laigle, D. et Bianco, G., 2000c. Mise en commun des méthodes et des connaissances sur les processus des laves torrentielles. Connexion des réseaux de données et mise en commun des connaissances et des expériences pour la gestion des risques d'inondations en région alpine (rapport), European program Interreg II, France - Italie, 135-176 p.

Brochot, S., Marchi, L. et Lang, M., 2002. L'estimation des volumes des laves torrentielles: méthodes disponibles et application au torrent du Poucet (Savoie). Bulletin de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement, 61: 389-402.

Brochot, S. et Meunier, M., 1996. Un modèle d'érosion des torrents en crue (ETC). Ingénierie-EAT, 6: 9-18.

Broscoe, A.J. et Thomson, S., 1969. Observation on an alpine mudflow, Steele creek, Yukon. Canadian Journal of Earth Sciences(6): 219-229.

Brunsden, D., 1979. Mass movements. Process in Geomorphology: 130-186.

Brunsden, D., 1993. Mass movement, the research frontier and beyond -A geomorphological approach. Geomorphology, 7: 85-128.

Brunsden, D., 2001. A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology. Catena, 42: 99-123.

Brunsden, D. et Thornes, J.B., 1979. Landscape sensitivity and change. Transactions of the Institute of British Geographers, 4: 463-484.

Bull, W.B., 1963. Alluvial-fan deposits in W. Fresno Country (California). J. Geol., 71: 243-251.

Bull, W.B., 1977. The alluvial fan environment. Progress in Physical Geography, 1: 222-270.

Burton, A.N., 1970. The influence of techtonics on the geotechnical properties of Calabrian rocks and

the mapping of slope instability using aerial photographs. Quaternary Journal of Engineering Geology, 2: 237-254.

Butler, P.R., 1977. Movement of cobbles in a gravel-bed stream during a flood season. Geological Society of America Bulletin, 88: 1072-1074.

Caine, N., 1980. The rainfall intensity-datation control of shallow landslides and debris flows. Geographiska Annaler, 62A(1-2): 23-27.

Campbell, B.L., Loughran, R.J. et Elliot, G.L., 1988. A method for determining sediment budgets using caesium-137. IAHS, n°174: 171-179.

Cannon, S.H., Gartner, J.E., Parrett, C. et Parise, M., 2003. Wildfire-related debris-flow generation through episodic progressive sediment-bulking processes, western USA. In: D. Rickenmann et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mecanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress Rotterdam Netherlands, Davos, pp. 71-82.

Carroll, C., Merton, L. et Burger, P., 2000. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines. Australian Journal of Soil Research, 38: 313-327.

Carson, B., 1985. Erosion and sedimentation processes in the Nepalese Himalaya. ICIMOD Occasional paper no. 1, Nepal Kathmandu.

Carson, M.A. et Kirkby, M.J., 1972. Hillslope Form and Process, Cambridge University Press, Cambridge, 475 p.

Cauvin, C., 1996. Bibliographie sur les transformations cartographiques - Bibliography of cartographical transformations, Cybergéo, pp. 9.

Cauvin, C., 1998. Des transformations cartographiques. Mappe-monde, 49: 12-15.

Cenderelli, D.A. et Kite, J.S., 1998. Geomorphic effects of large debris flows on channel morphology at North Fork Mountain, eastern West Virginia, USA. Earth Surface Processes and Landforms, 23(1): 1-19.

Cenderelli, D.A. et Wohl, E., 1998. Sedimentology and clast orientation of deposits produced by glacial-lake outburst floods in the Mont Everest region, Nepal. In: J. Kalvoda et C.L. Rosenfeld (editors), Geomorphological hazards in high moutain areas (conference proceedings). Kluver academic, The Netherlands, pp. 1-26.

Chadule, G., 1997. Initiation aux pratiques statistiques en géographie. Collection U, série «Géographie». 4, Paris, 203 p.

Chandler, J.H. et Brunsden, D., 1995. Steady-state behaviour of the Black Ven mudslide: the application of archival analytical photogrammetry to studies of landform. Earth Surface Processes and Landforms, 20: 255-275.

Chandler, J.H. et Moore, R., 1989. Analytical photogrammetry - a method for monitoring slope instability. Quaternary Journal of Engineering Geology, 22: 97-110.

Chang, S.Y., 2003. Evaluation of a system for detecting debris flows and warning road traffic at bridges susceptible to debris-flow hazard. In: R. Dieter et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress, Davos, pp. 731-742.

Chen, R.H. et Yang, S.C., 2000. Study on debris-flow triggered by pore water pressure. In: Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, W. Naeser (Editor), Balkema, Roterdam, pp. 44-53.

Chorley, R.J., 1962. Geomorphology and general system theory. USGS Professional Paper, 500B: 10.

Coe, J.A., Glancy, P.A. et Whitney, J.W., 1997. Volumetric analysis and hydrologic characterization of a modern debris flow near Yucca Mountain, Nevada. Geomorphology, 20: 11-28.

Coeur, D., 2001. Des associations de propriétaires pour lutter contre l'inondation : les syndicats de riverains dans la plaine de Grenoble (vers 1750-vers 1930). In: R. Favier (editor), Les pouvoirs publics face aux risques naturels dans l'histoire (conference proceedings). CNRS-MSH-Alpes, Grenoble, pp. 444.

Colas, G., 1987. Coulées boueuses. Laves torrentielles. 2- La crue torrentielle du Verdarel (Hautes-Alpes), 9 juillet 1981. Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussés, 150/151: 78-83.

Cosandey, C., 1995. La forêt réduit-elle l'écoulement? Annales de Géographie, 581-582: 7-25.

Costa, J.E., 1987. Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States. Journal of Hydrology, 93: 313-338.

Costa, J.E. et Jarrett, R.D., 1981. Debris flows in small moutain stream channels of Colorado and their hydrologic implications. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 18: 309-322.

Coussot, P., 1996. Les laves torrentielles. Connaissances à l'usage du praticien, 177 p.

Coussot, P. et Meunier, M., 1996. Recoghition, classification and mechanical description of debris flows. Earth-Science Reviews, 40: 209-227.

Crandell, D.R., 1971. Postglacial lahars from Mont Rainier volcano, Washington. U. S. Geol. Surv. Prof. Papers, 677: 1-75.

Crandell, D.R. et Waldron, H.H., 1956. A recent volcanic mudflow of exeptionnal dimensions from Mont Rainier, Washington. Am. J. Sci., 254(11): 349-362.

Curry, R.R., 1966. Observation of alpine mudflow in the Ten Mile Range, Central Colorado. Bull. Geol. Soc. Am., 77(7): 771-776.

Curry, R.R., 1967. On repeted photographs. Revue de Geomorphologie Dynamique, 17: 175-176.

D'Agostino, V., 1996. Analisi quantitativa e qualitativa del transporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale. Scritti dedicati a Giovanni Tournon. Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Associazione Idrotechnica Italiana: 111-123.

D'Agostino, V., Cerato, M. et Coali, R., 1996. Il transporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale, Int. Symp. Interpaevent (conference proceedings), pp. 377-386.

D'Ercole, R., 1994. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. Revue de Géographie Alpine, 82(4): 87-96.

Dalla Fontana, G. et Marchi, L., 1998. GIS indicators for sediment sources study in Alpine basins. IAHS, Publ. n°248: 553-560.

Dalsgaard, J., 1978. Stereoscopic vision -a problem in terrestrial photogrammetry. Photogrammetria, 34: 3-18.

Daudin, J.-J., Robin, S. et Vuillet, C., 1999. Statistiques inférentielle. Idées, démarches, exemples. Société Française de Statistiques et Presses Universitaires de Rennes, Rennes, 185 p.

Dauphiné, A. et Provitolo, D., 2003. Les catastrophes et la théorie des systèmes auto organisés critiques. In: Les risques, V. Moriniaux (Editor), éditions du temps, Nantes, pp. 16.

David, P. et Martin, E., 1997. Le laboratoire du Col de Porte: historique et climatologie. n°9 (rapport), Centre d'Etude de la Neige & Centre National de Recherche Météorologiques - Météo France, Grenoble, 80 p.

Davies, T.R., 1988. Debris flows surges - a laboratory investigation. Hydrologie-Glaziologie, 96, Mitt. Versuchsanst. Wasserbau, ETH Zürich, 122 p.

Davies, T.R., Phillips, C.J., Pearce, A.J. et Zhang, X.B., 1992. Debris flow behaviour - an integrated overview, Erosion, Debris floows and Environment in Mountain Regions (conference proceedings). IAHS Publication, Proceedings of the Chengdu Symposium, pp. 217-225.

De Gennes, P.G., 1999. Granular matter: a tentative view. Reviews of Modern Physics, 71(2): 374-382.

De Jong, C., 1992. A catastrophic flood/multiple debris floow in a confined mountain stream: an example from the Schmiedlaine, southern Germany, Erosion, Debris floows and Environment in Mountain Regions (conference proceedings). IAHS Publication, Proceedings of the Chengdu Symposium, pp. 237-245.

Decaulne, A., 2001. Dynamique des versants et risques naturels dans les fjords d'Islande du Nord-Ouest; l'impact géomorphologique et humain des avalanches et des débris flows. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 391 p.

Dedkov, A.P. et Moszherin, V.I., 1992. Erosion and sediment yield in mountain regions of the world, Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions (conference proceedings). IAHS, Proceeding of the Chengdu Symposium, pp. 29-36.

Delannoy, J.-J. et Rovera, G., 1996. L'érosion dans les Alpes occidentales: contribution à un bilan des mesures et des méthodes. Revue de Géographie Alpine(n°2): 87-101.

Delorme, M., 1999. Formation aux Systèmes d'Information Géographique et à l'utilisation du logiciel ArcView (rapport), ENGREF, 42 p.

Delrieu, G., 2005. Visibilité hydrologique. LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement) - Grenoble, http://www.lthe.hmg.inpg.fr/Hmet/Visibilite_hydro_radar.htm, accédé le 10/08/2005.

Demontzey, P., 1894. L'extinction des torrents en France par le reboisement, 1, Imprimerie Nationale, Paris, 449 p.

Derouiche A., B.-A.J., Cartagena D., 1997. Effet du couvert végétal sur le comportement hydrique et le transport solide dans une pinède à sous-bois arbustif et herbacé. Bulletin Réseau Erosion, 17: 24-36.

Derruau, M., 1988. Précis de géomorphologie. 7ème édition, Masson, 533 p.

Derruau, M., 1996. Datation, chronologie radiométrique. In: Composantes et concepts de la géographie physique. Armand-Colin, pp. 217-225.

Descroix, L., 1991. Les transports solides dans le Bèz. Bulletin du Laboratoire Rhodanien de Géomorphologie, 27-28: 55-70.

Descroix, L., 1994. L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud. Thèse de doctorat, Université Louis Lumière Lyon II, Lyon, 353 p.

Desloges, J.R., 1992. Sedimentology and paleohydrology of alpine multpile-process channels in southwestern Alberta. Master, Université University of Wisconsin-Madison.

Desplanches, J.-L., 1999a. Evolution temporelle de la production de matériaux dans les bassins-versants torrentiels: l'exemple de trois torrents des Alpes du Nord. Mémoire DEA, Université Savoie CISM, Chambéry, 55 p.

Desplanches, J.-L., 1999b. Evolution temporelle de la production de matériaux dans les bassins-versants torrentiels: l'exemple de trois torrents des Alpes du Nord. Mémoire DEA, Université Univ. de Savoie CISM, Chambéry, 55p. p.

Desurosne, I., Ribot-Bruno, J., Watremez, S. et Oberlin, G., 1996. Guide pratique des données pluviographiques et des résultats d'un réseau préalpin, le TPG (période 1987-1995). Interactions Pluies/Reliefs à l'échelle des intensités. Etat des données et des résultats au 01/08/1996. Perspectives à venir. (rapport), Cemagref et LaMP (Laboratoire de Météorologie Physique de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand), Lyon, 115 p.

Deymier, C., Tacnet, J.-M. et Mathys, N., 1995. Conception et calcul de barrages de correction torrentielle, n°18, Cemagref, Antony, 287 p.

Diallo, D., Orange, D., Roose, E. et Morel, A., 2000. Potentiel de production de sédiments dans le bassin

versant de Djitiko (103 km²), zone Soudanienne du Mali Sud. Bulletin Réseau Erosion, 20: 54-66.

Dietrich, W.E. et Dunne, T., 1978. Sediment budget in a small catchment in mountainous terrain. Zeitschrift für Geomorphologie N. F., Suppl. 29: 191-206.

Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R. et McKean, J., 1993. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology, usind digital terrain model. Journal of Geology, 101: 259-278.

Dolfus, O., 1960. Etude d'un bassin torrentiel dans la vallée du Rimac (Andes centrales péruviennes). Rev. Géomorphol. Dyn., VIII(11-12): 161-165.

Duck, R.W. et McManus, J., 1994. A long-terme estimate of bedload and suspended sediment yield derived from reservoir deposits. Journal of Hydrology, 159: 365-373.

Dumolard, P., Allignol, F., Paul, E. et Quesseveur, E., 2003. L'outil informatique en géographie, http://hdl.handle.net/1801/19, accédé le 15/08/2005.

Egels, Y., 2001. Poivilliers E. (rapport), IGN / ENSG, 22 p.

Egels, Y., Kasser, M., Meunier, M., Muxart, T. et Guet, C., 1989. Utilisation de méthodes topographiques (photogrammétrie terrestre et télémétrie sans réflecteur) pour la mesure de l'érosion de petits bassins versants expérimentaux et comparaison avec les mesures de transport solide à l'émissaire. Comptes Rendus de recherche en érosion et hydraulique torrentielle, 2. Cemagref Grenoble et Aix en Provence / ONF-RTM des Alpes de Haute-Provence, 7-25 p.

Eisbacher, G.H., 1982. Moutain torrents and debris flows. Episode, 4: 12-17.

Eisma, D., 1993. Suspended matter in the aquatic environment, Spinger-Verlag, 315 p.

Engelen, G.B. et Venneker, G.W., 1988. ETA (Erosion Transport Accumulation) systems, their classification, mapping and management. IAHS, Publ. n° 174: 397-412.

Enos, P., 1977. Flow regime in debris flow. Sedimentology, 24: 133-142.

Escher, B.G., 1922. On the hot "lahar" (mud flow) of the Valley of Ten Thousand Smokes, Alaska, Koninklijke Akademie van Wetenschappen (conference proceedings). Proceedings Science Section, Amsterdam, pp. 282-293.

Evans, S.G., 1982. Landslides and surficial deposit in urban areas of British Columbia: a review. Can. Geotch. J.(30): 71-81.

Fannin, R.J. et Rollerson, T.P., 1993. Debris flows: some physical characteristics and behaviour. Canadian Geotechnical Journal, 30: 71-81.

Fannin, R.J. et Wise, M.P., 2001. An empirical-statistical model for debris flow travel distance. Canadian Geotechnical Journal, 38(5): 982-994.

FAO, 1981. Torrent control terminology, FAO conservation guide, Rome, 156 p.

Favier, R. et Granet-Abisset, A.-M., 2001. Histoire et mémoire des risques naturels, Maison des Sciences de l'Homme-Alpes, Grenoble, 282 p.

Fink, J.H., Malin, M.C., D'Alli, R.E. et Greeley, R., 1981. Rheological properties of mud flows associated with the spring 1980 eruptions of Mont St. Helens volcano, washindton. Geophysical Research Letters, 8(1): 43-46.

Fischesser, B., 1982. La vie de la montagne. Chêne/Hachette, Milan, 260 p.

Fisher, R.V. et Schmincke, H.U., 1984. Lahars, Pyroclastic rocks, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 472 p.

Flageollet, J.-C., 1989. Les mouvements de terrain et leur prévention. Géographie, Masson, Paris, 224 p.

Florsheim, J.L., Keller, E.A. et Best, D.W., 1991. Fluvial sediment transport in response to moderate storm flows following chapparal wildfire, Ventura County, southern California. Geological Society of America Bulletin, 103: 504-511.

Francou, B., 1988. L'éboulisation en haute montagne (Andes et Alpes), Editec, Caen, 696 p.

Fryer, J.G., Chandler, J.H. et Cooper, M.R., 1994. Short communication on the accuracy of heighting from aerial photographs and maps: implications to process modellers. Earth Surface Processes, 19: 577-583.

Gachet, J.N., 1980. Conception des ouvrages de défense passive, Cemagref/ENITRTS.

Gallino, G.L. et Pierson, T.C., 1985. Polallie Creek debris flow and subsequent dam break flood of 1980, East Fork Hood River Basin, Oregon. U.S. Geological Survey Water Supply Papers, 2273, 22 p.

Gavrilovic, Z. et Matovic, Z., 1991. Review of disastrous torrent flood on the Vlasina River on June 26, 1988, including analysis of flood and the obtained results. In: A. Armanini et G. DiSilvio (editors), Fluvial hydaulics of mountain regions (conference proceedings). Springer-Verlag, Berlin, pp. 235-250.

Gessler, 1965. Beginning of deadload movement of mixtures investigated as natural armoring in channels. Report n°69 (rapport), Laboratory of hydraulic research and soil mechanics of Swiss federal institute of technology, Zurick.

Gidon, M., 2004. Geol-Alp, Une approche de la géologie des Alpes françaises: La dépression du col d'Ornon, http://www.geol-alpes.com/h_oisans/_lieux/bonne/ornon_general.html, accédé le 17/02/2004.

Gignoux, M. et Moret, L., 1952. Géologie Dauphinoise, Masson et Cie, paris, 391 p.

Gilbert, G.K., 1917. Hydraulic-mining debris in the Sierra Nevada. United States Geological Survey Professional Paper, 105.

Gili, J.A., Corominas, J. et Ruis, J., 2000. Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. Engineering Geology, 55: 167-192.

Girardin, P., 1906. La débâcle du Charmaix-aux-Fourneaux, dite «éboulement de Modane» - 23 juillet 1906. Bull. Soc. Géogr., XIV(2): 143-152.

Givone, C., 1997. Prévisions des précipitations à petites échelles de temps et d'espace. Risques Infos, 8: 5-7.

Graff, B., 2000. Etude des réseaux hydro-pluviométriques dans les grandes communautés urbaines. Application à la Région Grenobloise. REA 2e année, Université INPG et LTHE, Grenoble, 46 p.

Grant, G.E., Swanson, F.J. et Wolman, M.G., 1990. Pattern and origin of stepped-bed morphologyin high gradiant streams, Western Cascades, Oregon. Geological Society of American Bulletin, 102: 340-352.

Grove, J.M., 1972. The incidence of landslides, avalanches and floods in Western Norway during the Little Ice Age. Artic and Alpine Research, 4(2): 131-138.

Grove, J.M., 1987. The little ice age, Methuen, London, 498 p.

Gruber, M. et Leberl, F., 2001. Description and evaluation of the high quality photogrammetric scanner UltraScan 5000. Journal of Photogrammetry and Remote sensing, 55(5-6): 313-329.

Gruffaz, F., 1997. Torrent du Manival (Isère). Etude de bassin et de la plage de dépôts torrentiels (rapport), RTM / ONF, Grenoble, 66 p.

Guadagno, F.M., Forte, R., Revellino, P., Fiorillo, F. et Focareta, M., 2005. Some aspects of the initiation of debris avalanches in the Campania Region: the role of morphological slope discontinuities and the development of failure. Geomorphology, 66(1-4): 237-254.

Gurnell, A.M., Piégay, H., Swanson, F.J. et Gregory, S.V., 2002. Large wood and fluvial processes. Freshwater Biology, 47: 601-619.

Guyon, E. et Troadec, J.P., 1994. Du sac de bille au tas de sable, Odile Jacob, 336 p.

Hack, J.T., 1960. Interpretation of erosional topography in humid temperate regions. Am. J. Sci., 258: 80-97.

Haeberli, W., Rickenmann, D., Zimmermann, M. et Roesli, U., 1990. Investigation of 1987 debris flows in the Swiss Alps: general concept and geophysical soundings. IAHS, Publ. n°194: 303-310.

Hampel, R., 1977. Geschiebewirtschaft in Wildbächen. Wildbach und Lawinenverbau, 41: 3-34.

Hanisch, J., Ergenzinger, P. et Bonte, M., 2003. Dumpling - an „intelligent“ boulder for studying internal processes of debris flows. In: R. Dieter et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress, Davos, pp. 843-849.

Harvey, A.M., 1991. Influence of sediment supply on the channel morphology of upland streams: Howgill Fells, Northwest England. Earth surface processes and landforms, 16: 675-684.

Harvey, A.M., 1994. Influence of Slope/Stream Coupling on Process Interactions on Eroding Gully Slopes: Howgill Fells, Northwest England. In: M.J. Kirkby (editor), Process Models and Theoretical Geomorphology (conference proceedings), pp. 247-270.

Hashimoto, T., 2000. DEM generation from stereo AVNIR images. Adv. Space Res., 25(n°5): 931-936.

Hasholt, B. et Walling, D.E., 1992. Use of caesium-137 to investigate sediment sources and sediment delivery in a small glacierized mountain drainage basin in eastern Greenland. IAHS, Publ. n°209: 87-100.

Hegg, C., Kienholz, H. et Weingartner, R., 1996. Mountain torrent hydrology and geomorphology in the Leissigen Research area, Internationales Symposium Interpaevent (conference proceedings), Garmish-Partenkirchen, pp. 309-318.

Henry, J.B., 2004a. Cours de topographie et de topométrie générale - Chapitre 2: Methodes topométriques, E:\Mes Sites Web\Thèsard Henry SuperSauze\jb.henry.free.fr\cours\chapitre_2.pdf, accédé.

Henry, J.B., 2004b. Cours de topographie et de topométrie générale - Chapitre 4: Les mesures indirectes, E:\Mes Sites Web\Thèsard Henry SuperSauze\jb.henry.free.fr\cours\chapitre_4.pdf, accédé.

Henry, J.B., Malet, J.P., Maquaire, O. et Grussenmeyer, P., 2002. The use of small format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution DEMs in mountainous areas. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). Earth Surface Processes and Landforms, 27(12): 1339-1350.

Herschel, W.H. et Bulkley, R., 1926. Uber die viskosität und Elastizität von Solen. Proc. Am. Soc. Test. Mater., 26: 621-633.

Heward, 1978. Alluvial fans sequence and megasequence models. In: A.D. Miall (editor), Fluvial Sedimentology (conference proceedings). Canadian Society of petroleum Geologist, pp. 669-702.

Hewitt, K., 1998. Catastrophic landslides and their effects on the Upper Indus streams, Karakoram Himalaya, northern Pakistan. Geomorphology, 26: 47-80.

Hill, R.D. et Peart, M.R., 1998. Land use, runoff, erosion and their control: a review for southern China. Hydrological Processes, 12: 2029-2042.

Hooke, R.L., 1967. Processes on arid-region alluvial fans. Journal of Geology, 75: 438-460.

Hooke, R.L. et Rohrer, W.L., 1979. Geometry of alluvial fans: effect of discharge and sediment size. Earth Surface Processes, 4: 147-166.

Horowitz, A.J. et al., 1992. The use of automatically collected point samples to estimate suspended sediment and associated trace element concentrations for determining annual mass transport. I.A.H.S., Pub. N°210: 209-219.

Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative geomorphology. Geological Society of American Bulletin, 56(3): 275-370.

Hubbel, D.W., 1964. Apparatus and techniques for measuring bedload. U. S. Geol. Surv. Water-Supply Paper, 1748.

Huberty, B. et Anderson, C., 1990. Coal pile inventory using 35-mm oblique terrestrial photogrammetry. Photogram. Eng. Remote Sensing, 56: 1169-1171.

Huchon, H., 1981. Aménagement et érosion torrentielle: la Ravoire des Arcs. In: LAMA (editor), Montagne et Aménagement (conference proceedings), Grenoble, pp. 35-40.

Hungr, O., Morgan, G., C. et Kellerhals, R., 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. Canadian Geotechnic Journal, 21: 663-677.

Hurault, J., 2000. Une discipline injustement négligée: la photo-interprétation stéréoscopique. Bulletin Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, n°160 (2000-4): 13-20.

Hürlimann, M., Corominas, J., Moya, J. et Copons, R., 2003. Debris-flow events in the eastern Pyrenees: preliminarystudy on initiation and propagation. In: R. Dieter et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress, Davos, pp. 115-126.

Ikeda, A. et Hara, Y., 2003. Flow properties of debris flows on the Kitamata Valley of the Name River, Japan. In: R. Dieter et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress, Davos, pp. 851-862.

Ikeda, H., Iseya, F. et Kodama, Y., 1993. Sedimentation on an alluval cone in the Upper Oi River, central Japan. Bulletin of the Tsukuba University Forests (Japan), 9: 149-173.

Innes, J.L., 1983. Debris flows. Progress in Physical Geography, 7: 469-501.

Innes, J.L., 1985. Magnitude-frequency relations of debris flows in northwest Europe. Geogr. Ann., 67 A (1-2): 23-32.

Institute of Highway, Ministry of communication - People's Republic of China, 1978. The mudrock flows along the Szechuan-Tibet highway and their prevention and control. Bull. Ass. Int. Geol. Ing., 17: 58-60.

Iverson, R.M., 1997. The physics of debris flows. Reviews of Geophysics, 35: 245-296.

Iverson, R.M., 2003. The debris-flow rheology myth. In: R. Dieter et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress, Davos, pp. 303-314.

Jackson Jr, L.E., 1979. A catastrophic glacial outburst flood mechanism for debris flow generation at the Spiral Tunnels. Rev. Can. Geotech., 16: 806-813.

Jacob, N., Gob, F., Petit, F. et Bravard, J.-P., 2002. Croissance du lichen Rhizocarpon geographicum l.s. sur le pourtour nord-occidental de la Méditerranée observations en vue d'une application à l'étude des lits fluviaux rocheux et caillouteux - Growth curves of Rhizocarpon geographicum l.s. in granitic mountains of the French Mediterranean: application to bedrock and gravel river studies. Geomorphologie, 31(4): 283-296.

Jakob, M., 1996. Morphometric and geotechnical controls of debris flows frequency and magnitude in southwestern British Colombia. Thèse de Doctorat, Université British Colombia.

Janda, R.J. et al., 1997. Assessment and response to lahar hazard around Mount Pinatubo, 1991 to 1993. In: C.G. Newhall et R.S. Punongbayan (editors), Fire and Mud : eruptions and lahars of Mt Pinatubo, Philippines. (conference proceedings). Washington Press, pp. 107-137.

Janda, R.J., Scott, P.J., K.M., N. et Martnson, H.A., 1981. Lahar movement, effects, and deposits, in the 1980 eruptions of Mont St Helens, Washington. USGS Professional Paper, 1250.

Jian, L. et Defu, L., 1980. The formation and characteristics of mudflow in the mountain area of the Dacha torrent and its prevention. Z. Geomorphol., 25(4): 470-483.

Jian, L., Jianmo, Y., Cheng, B. et Defu, L., 1983. The main features of the mudflow in Jiang-Jia Ravine. Zeitschrift für Geomorphologie, 273.

Johnson, A.M., 1970. Physical Processes in Geology, Freeman, Cooper & Co, San Francisco, 577 p.

Johnson, A.M. et Rodine, J.R., 1984. Debris Flows. In: Progress in Physical Geography, pp. 469-501.

Johnson, P.A., McCuen, R.H. et Hromadka, T.V., 1990. Magnitude and frequency of debris flows. Journal of Hydrology, 123: 69-82.

Jones, C., 1997. Geographical Information Systems and Computer Cartography, Longman, 319 p.

Karim, M.F. et Kennedy, J.F., 1986. Degradation of gravel-material beds in sediment-deficient rivers. International Journal of Sediment Research, 1(1): 39-55.

Keller, E.A., 1978. Areal sorting of bed load material: the hypothesis of velocity reversal. Geological Society of America Bulletin, 89.

Kidson, C., Collin, R.L. et Chisholm, N.W.T., 1989. Surveying a major dun system - Braunton Burrows, North-West Devon. Geographical Journal, 155: 94-105.

Kieffer Weisse, A., 1998. Etude des précipitations exeptionnelles de pas de temps court en relief accidenté (Alpes françaises). Méthode de cartographie des précipitations extrêmes. Relations avec le contexte topographique. Utilisation de l'information au pas de temps de la journée. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 314 p.

Kienholz, H. et Mani, 1996a. Contribution to the reduction of debris flow damage, with the analysis of triggering factors, initiation, propagaton and deposition phenomena, in the Alpine region. Contract n°EV5V-CT94-0453 (rapport).

Kienholz, H. et Mani, P., 1996b. Contribution to the reduction of debris flow damage, with the analysis of triggering factors, initiation, propagaton and deposition phenomena, in the Alpine region. Contract n°EV5V-CT94-0453 (rapport).

Kirby, R.P., 1991. Measurement of surface roughness in desert terrain by close range photogrammetry. Photogrammetric Record, 13: 855-875.

Knighton, D., 1998. Fluvial forms and processes. A new perspective, Arnold, London, 383 p.

Kondolf, G.M. et Graham Matthews, W.V., 1991. Unmeasured residuals in sediment budgets: a cautionary note. Water Resources research, 27(9): 2483-2486.

Kostadinov, S., Markovic, S., Zlatic, M., Stojkov, N. et Milosevic-sickinger, S., 1996. Influence de la couverture végétale sur la répartition et l'intensité de l'érosion hydrique dans le bassin versant - Effect of vegetative cover on the distribution and intensity of water erosion in the watershed, Internationales Symposium Interpraevent (conference proceedings). Tagungspublikation, Garmisch-Partenkirchen, pp. 225-234.

Koulinski, V., 1994. Etude de la formation d'un lit torrentiel. Equipement pour l'Eau et l'Environnement, n°15, Grenoble, 538 p.

Koulinski, V., 2002. La crue de l'Arbonne à Bourg St Maurice (73). ETRM, http://perso.libertysurf.fr/etrm/arbonne.htm#début, accédé le 15/09/2005.

Koulinski, V., 2004. Etude d'aménagement du haut bassin versant de la Malsanne (rapport), E.T.R.M./ R.T.M. de l'Isère/ Commune de Chantelouve, Séez, 70 p.

Kronfellner-Kraus, G., 1985. Quantitative estimation of torrent erosion, International symposium on erosion, debris flow, and disaster prevention (conference proceedings), Tsukuba, Japan, pp. 107-110.

Kronfellner-Kraus, G., 1986. New results and experiences in the quantitative estimation of torrents.

In: S.G.S. IUFRO (editor), Contributions to Research on Torrent Erosion and Avalanches (conference proceedings), Wien, pp. 69-87.

Kuczera, S., 1999. Etude de laves torrentielles sur le site de l'Illgraben (rapport), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 22 p.

Lahlou, A., 1988. The silting of Morroccan dams. IAHS, Publ. n°174: 71-77.

Lahousse, P. et Salvador, P.-G., 1999. Elements de réflexion sur la prévisibilité des crues torrentielles du 24 juillet 1995 dans la vallée de la Guisane (Alpes françaises, Briançonnais). Revue de Géographie Alpine, 1999 n°4: 25-34.

LaHusen, R.G., 1996. Detecting debris flows using ground vibrations. U. S. Geol. Surv. Fact Sheet, 236(96).

Laigle, D., 1998. La modélisation des écoulements de laves torrentielles boueuses: de la validation au laboratoire au zonage des risques sur le terrain. Ingénierie-EAT, 15: 79-88.

Laigle, D. et Marchi, L., 2000. Example of mud / debris-flow hazard assessment, using numerical models. In: W. Naeser (editor), Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, prediction, and assessment (conference proceedings). Balkema, Rotterdam.

Landon, N., 1999. L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen, constat régional et analyse d'un hydrosystème complexe, la Drôme. Thèse de Doctorat en Géographie et Aménagement du Territoire, Université Paris IV-Sorbonne, 545 p.

Lane, E.W., 1953. Design of stable channels. Proceeding of the American Society of Civil Engineers, 79(paper n°280): 1-31.

Lane, N.S., 2000. The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. Photogrammetric Record, 16: 937-961.

Lane, N.S., Chandler, J.H. et Richards, K.S., 1994. Developments in monitoring and modelling small-scale river bed topography. Earth Surface Processes and Landforms, 19: 349-368.

Lane, N.S., Richards, K.S. et Chandler, J.H., 1993. Developments in photogrammetry; the geomorphological potential. Progress in Physical Geography, 17(3): 306-328.

Lang, M., Coeur, D., Brochot, S. et Naudet, R., 2003. Information historique et ingénierie des risques naturels, l'Isère et le torrent du Manival. Gestion des milieux aquatiques. Cémagref, Grenoble, 179 p.

Langlois, P. et Denain, J.C., 1997. Anamorphose, analyse d'une métaphore spatiale. Revue internationale de géomatique, 7(1): 33-56.

Langlois, P. et Denain, J.C., 1998. Cartographie en anamorphose. Mappe-monde, 49: 16-19.

Larsen, I.L., 1990. Sediment-water interaction in a small stream: adsorbtion of Cs-137 by bed load sediments. Water Resources research, Vol. 26, n°6: 1165-1176.

Larsen, M.C., 2002. Venezuela Flash-flood and Landslide Disaster. USGS, http://pr.water.usgs.gov/public/venezuela/, accédé le 20/09/2005.

Latulippe, C. et Peiry, J.-L., 1996. Essai de hiérarchisation des zones de production de matière en suspension dans le bassin versant d'un grand cours d'eau: l'Isère en amont de Grenoble. Revue de Géographie Alpine, 1996 n°2: 29-44.

Laugier, P. et Cojean, R., 2001. Analyse de scénarios d'événements «laves torrentielles» dans le bassin versant de l'Arbonne (Bourg-Saint-Maurice, Savoie, France). Revue Française de Géotechnique, N°95/96: 41-54.

Lavigne, F., 1998. Les lahars du volcan Merapi, Java central, Indonésie : déclenchement, budget sédimentaire, dynamique et zonage des risques associés. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 539 p.

Lavigne, F. et Suwa, H., 2004. Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. Geomorphology, 61(1-2): 41-58.

Lavigne, F. et Thouret, J.-C., 2000. Les lahars: dépôts, origines et dynamique. Bulletin Société Géologique de France, 171(n°5): 545-557.

Lavigne, F., Tirel, A., Le Floch, D. et Veyrat-Charvillon, S., 2003. A real-time assessment of lahar dynamics and sediment load based on video-camera recording at Semeru volcano, Indonesia. In: R. Dieter et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress, Davos, pp. 871-882.

Lawler, D.M., 1993. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. Eath Surfaces and Landforms, 18: 777-821.

Le Méhauté, N., 2000. Elaboration d'une méthode d'étude basée sur la topographie du transit sédimentaire en milieu torrentiel. Etude réalisée sur le Manival (Isère). DESS, Université Université de Savoie, Chambéry, 74 p.

Lechalas, M.C., 1884. Hydraulique fluviale - météorologie et hydrologie, la Loire, le Rhône, les grandes crues, les barrages. Librairie Polytechnique - Baudry & Cie, Paris, 464 p.

Lehmann, C., 1999. Assessment of Sediment Yield for the Design of Protecting Measures in Torrents, La gestione del l'erosion - Scienza tecnica e strumenti a confronto per il controlo dei fenomeni torrentizi (conference proceedings). Provincia Autonoma di Trento e Bolzano, IRST Povo di Trento, pp. 7.

Lehmann, C., Spreafico, M. et Naef, O., 1996. Empfehlung zur Abschätzung von Feststoffrachten in Wildbächen. Communication n°4, Teil II, Service hydrologique et géologique national, Bern, 113 p.

Leopold, J.R. et Wolmann, M.G., 1957. River channel patterns: Braided, Meandering and Straight. U. S. Geol. Surv. Prof. Papers(282-B).

Levallois, J.J., 1960. Topométrie générale, 1. 3, Ministère des travaux publics et des transports - Institut Géographique National, Paris, 152 p.

Li, G. et Abrahams, A.D., 1999. Controls of sediment transport capacity in laminar interrill flow on stone-covered surfaces. Water Resources Research, Vol.35, N°1: 305-310.

Liébaut, F., 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies). Thèse de doctorat, Université Lumière, Lyon, 357 p.

Lisle, T.E., 1987. Channel morphology and sediment transport in steepland streams, Erosion and sediment in the Pacific Rim (conference proceedings). IAHS, Corvallis, pp. 287-298.

Little et Mayer, 1976. Stability of channel beds by armoring. J. Hydraul. Div. Proc. Am. Soc. Civ. Eng., 102: 1647-1661.

Lliboutry, L., 1964. Traité de glaciologie, Masson, Paris, 1040 p.

Loughran, R.J., Campbell, B.L., Shelly, D.J. et Elliott, G.L., 1992. Developing a sediment budget for small drainage basin in australia. Hydrological Processes, Vol. 6: 145-158.

Lowe, D.R. et al., 1986. Lahars initiated by the 13 November, 1986 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia. Nature, 324: 51-53.

Loye-Pilot, M.D., 1984. Coulées boueuses et laves torrentielles en Corse. Exemples de mouvements de terrain en pays méditerranéen montagnard, Mouvements de terrain (conference proceedings). BRGM, Université de Caen, pp. 23-40.

Luckey, B.T., Sheffield, J., Bathurst, J.C., Hiley, R.A. et Mathys, N., 2000. Test of SHETRAN technology for modelling the impact of reforestation on badlands runoff and sediment yield at Draix, France. Journal of Hydrology, 235(1-2): 44-62.

Luckman, B.H., 1988. Debris accumulation patterns on talus slopes in Surprise Valley, Alberta. Geographie Physique et Quaternaire, 42(3): 247-278.

Luckman, B.H., 1992. Debris flows and snow avalanche landforms in the Lairig Ghru (Cairngorm Mountains, Scotland). Geografisca Annaler, 74A: 109-121.

Lundstrom, S.C., Mc Cafferty, A.E. et Coe, J.A., 1993. Photogrammetric analysis of 1984-89 surface altitude change of the partially debris-covered Eliot Glacier, Mont Hood, Oregon, U.S.A. Annals of Glaciology, 17: 167-170.

Magny, M., 1995. Une histoire du climat: des derniers mammouths au siècle de l'automobile, Errance, Paris, 176 p.

Major, J.J., 1997. Depositionnal processes in large scale debris-flow experiments. Journal of Geology, 105: 345-366.

Malavoi, J.R., 1992. Méthodologie de sectorisation et de description des cours d'eau à pente forte et moyenne - Application à une gestion intégrée des écosystèmes d'eau courante. Thèse de doctorat, Université Université Jean Moulin Lyon III, Lyon.

Malavoi, J.R. et Souchon, Y., 1989. Méthodologie de description et quantification des variables morphodynamiques d'un cours d'eau à fond caillouteux. Exemple d'une station de la Fillière (Haute-Savoie). Revue de Géographie de Lyon, 64(4): 252-259.

Manche, Y., 2000. Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels. Thèse de Doctorat, Université Grenoble I Joseph Fourier, Grenoble, 171 p.

Marchi, L., 1999. Tentative estimation of debris flow volumes and peak discharge in the Poucet torrent (Savoie, French Alps), pp. 15.

Marchi, L. et Trecca, P.R., 1996. Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientali Italiane. Geoingegneria Ambientale a Mineraria, 33, n°2/3: 79-86.

Marie, R., 1992. Typologie des situations de danger (rapport), Cemagref, Grenoble.

Marston, R.A., 1993. L'homme et la rivière dans les montagnes rocheuses (E.U.): réponse au changement naturel et à l'intrusion humaine. Le fleuve et ses métamorphoses(F. Piquet): 25-29.

Marutani, T., Brierley, G.J., Trustrum, N.A. et Page, M. (Editors), 2001. Source-to-sink sedimentary cascades in Pacific Rim Geo-systems. Matsumoto Sabo Work Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Nagano, Japan, 184 p.

Marutani, T., Kasai, M., Reid, L.M. et Trustrum, N.A., 1999. Influence of storm-related sediment storage on the sediment delivery from tributary catchments in the upper Waipaoa River, New Zealand. Earth Surface Processes and Landforms, 24(10): 881-896.

Massa, W.S., 1958. Inventory of large coal piles. Photogram. Eng., 24: 77-81.

MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement), 1997. Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), guide général, La Documentation française, Paris, 76 p.

Mathys, N., 1988. Les torrents du St-Eynard (rapport), Cemagref, Grenoble.

Mathys, N., Brochot, S. et Meunier, M., 1996. L'érosion des Terres Noires dans les Alpes du Sud: contribution à l'estimation des valeurs annuelles moyennes (bassins versants expérimentaux de Draix, Alpes-de-haute-Provence, France). Revue de Géographie Alpine, 1996 n°2: 17-27.

Matthews, M.C. et Clayton, C.R.I., 1986. The use of oblique aerial photography to investigate the extent and sequence of landsliding at Staghill, Guildford, Surrey. Engineering Geology Special Publication, 2: 309-315.

McIvor, J.G., Williams, J. et Gardener, C.J., 1995. Pasture management influences runoff and soil movement in the semi-arids tropics. Australian Journal of Experimental Agriculture, 35: 55-65.

Météo-Isère, 2005. Le climat de l'Isère. Météo Isère, http://www.meteoisere.com/climat.htm, accédé le 25/07/2005.

Meunier, M., 1988. Erosion et hydraulique torrentielles. Session n°137 du Comité Technique (rapport), Société hydrotechnique de France, 32 p.

Meunier, M., 1991. Hydraulique torrentielle. Montagne. 1, Louis Jean - Gap, Grenoble, 278 p.

Meunier, M. et Bertran, P., 2001. Charriage torrentiel. In: Dépôts de pente continentaux. Dynamique et faciès, BRGM (Editor), pp. 12.

Miramont, C. et Guilbert, X., 1997. Variation historique de la fréquence des crues et évolution de la morphogénèse fluviale en moyenne Durance (France du Sud). Geomorphologie, 4: 325-338.

Mitchell, H.L. et Newton, I., 2002. Medical photogrammetric measurement: overview and prospects. Journal of Photogrammetry and Remote sensing, 56: 286-294.

Mizuyama, T., 1977. Bedload transport in steep channels. Thèse de Doctorat, Université Kyoto, Kyoto - Japan, 118 p.

Montgomery, D.R. et Buffington, J.M., 1993. Channel Classification, Prediction of Channel Response, and Assessment of Channel Condition. TFW-SI-110-93-002 (rapport), SHAMW committee of the Washington State Timber/Fish/Wildlife Agreement, Washington, 84 p.

Moody, J.A. et Meade, R.H., 1994. Evaluation of the method of collecting suspended sediment from large rivers by discharge-weignted pumping and separation by continuous-flow centrifugation. Hydrological Processes, 8: 513-530.

Moore, J.F.A., 1973. The photogrammetric measurement of constructional displacement of a rockfill dam. Photogrammetric Record, 7: 57-67.

Moore, J.F.A., 1974. Mapping major joints in the Lower Oxford Clay using terrestrial photogrammetry. Quaternary Journal of Engineering Geology, 7: 57-67.

Morton, D.M. et Campbell, R.H., 1874. Spring mudflows at Wrightwood (Southern California). Q. J. Eng. Geol., 7: 377-384.

Mougin, P., 1914. Les torrents de Savoie, Grand Etablissement imprimerie nationale, Grenoble, 1251 p.

Muraz, J., Durrieu, S., Labbé, S., Andréassian, V. et Tangara, M., 1999. Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG ? Ingénieries - EAT, n°20: 39-58.

Naqash, A.B., 1965. Application of terrestrial photogrammetry to glacier surveys in the Taku District, Alaska. Unpublished M. Sc. Thesis, Université Michigan State, 90 p.

Nasmith, H.W. et Mercer, A.G., 1979. Design of dykes to protect against debris flows at Port Alice, British Colombia. Can. Geotch. J., 16: 748-757.

Neboit, R., 1991. L'homme et l'érosion, l'érosion des sols dans le monde, Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 269 p.

Okuda, S., Suwa, H., Okunishi, K., Yokoyama, K. et Nakano, M., 1980. Observations on the motion of a debris flow and its geomorphological effects. Z. Geomorphol., Sup. Bd 35: 142-163.

Olive, L.J. et Rieger, W.A., 1992. Stream suspended sediment transport monitoring - why, how and what is being measured ? I.A.H.S., Pub. N°210: 245-254.

Olyphant, G.A. et Harper, D., 1995. Effects of direct revegetation on the hydrology, erosion and sediment yield of an abandoned deposit of coal-mine refuse. Geomorphology, 11: 261-272.

Parker, G., 1989. Downstream variations of grain size in gravel bed river: abrasion versus selective sorting, International Workshop on fluvial hydraulics of mountains regions (conference proceedings), Trent -Italie.

Peart, M.R., 1989. Methodologies currently available for the determination of suspended sediment source: a critical review, Fourth International Symposium on River Sedimentation (conference proceedings), Beijing, China, pp. 150-157.

Peart, M.R. et Walling, D.E., 1988. Techniques for establishing suspended sediment sources in two drainage basins in Devon, UK: a comparative assessment. IAHS, Publ. n°174: 269-279.

Pech, P., 1986. Essais de quantification de l'ablation en moyenne et haute montagne a partir d'analyses volumétriques: l'exemple de l'Ossola (Alpes centrale, Italie du nord, 46° lat. N.) - Attempts at measuring erosion in medium and high mountain from volumetric analysis: Ossola's exemple (central Alps, northern Italy, 46° lat. N.). Revue de géomorphologie dynamique, T.XXXV: 11-20.

Peiry, J.-L., 1988. Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments d'un cours d'eau intra-montagnard: l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Hte-Savoie). Doctorat, Université Jean Moulin - Lyon III, Lyon, 378 p.

Peiry, J.-L., 1990. Les torrents de l'Arve : dynamique des sédiments et impact de l'aménagement des bassins versants sur l'activité torrentielle. Revue de Géographie Alpine, LXXVIII(1-2-3): 26-58.

Peiry, J.-L., 1996. La charge en suspension et la charge dissoute dans l'Isère à Grenoble : protocole de mesure et de test des données. Revue de Géographie Alpine(1996 n°2): 103-110.

Peiry, J.-L., 1997. Recherche en géomorphologie fluviale dans les hydrosystèmes fluviaux des Alpes du nord. Mémoire de HDR, Université Joseph Fourier, Grenoble France, 308 p.

Périnet, F., 1982. Stations de sport d'hiver. Réflexions à propos d'un accident. Rev. For. Fran., XXXIV(5).

Petts, G.E. et Bravard, J.P., 1993. Le réseau hydrographique dans le bassin versant. In: Hydrosystèmes fluviaux, Masson (Editor), Paris, pp. 21-42.

Phan Thien, N. et Dudek, J., 1982. Pulsating flow of a plastic fluid. Nature, 290: 843-844.

Phillips, J.D., 1991. Fluvial sediment budgets in the North Carolina Piedmont. Geomorphology, 4: 231-241.

Piégay, H. et Schumm, S.A., 2003. System approach in fluvial geomorphology. In: Tools in fluvial geomorphology, G.M. Kondolf et H. Piégay (Editors), Wiley, J. & Sons, Chichester, pp. 105-134.

Pierson, T.C., 1980. Erosion and deposition by debris flow at Mount Thomas (North Canterbury, New Zealand). Earth Surface Processes, 5: 227-247.

Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.-C. et Borrero, C.A., 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 41(1-4): 17-66.

Pigeon, P., 1998. Représentation cartographique du risque et vulnérabilité liée à la pression foncière touristique (Taconnaz, Les Houches et Vers-le-Nant, Chamonix). Revue de Géographie Alpine, 86(2): 101-113.

Ployon, E., 2002. Sediment supply and sediment transport in mountain drainage basins : the role of heritages and recent evolutions of fluvial system in their actual dynamics. The case study of the Gresse River, Isère France., Sediment Management in River Systems : Basin-Scale Approaches (conference proceedings), Eurre.

Powers, P.S., Chiarle, M. et Savage, W.Z., 1996. A digital photogrammetric method for measuring horizontal surficial movements on the slumgullion earthflow, Hinsdale County, Colorado. Computer and Geosciences, 22(6): 651-663.

PWRI, 1984. Basics of planning measures against debris flow; planning countermeasures against debris flow. Technical standards for Erosion and Sediment Control (rapport), Public WorksResearch Institute, Ministry of Construction. Japan.

Quine, T.A., Walling, D.E., Zhang, X. et Wang, Y., 1992. Investigation of soil erosion on terraced fields near Yanting, Sichuan province, China, using caesium-137. IAHS, Publ. n°209: 155-168.

R.T.M., 1982. Proces-verbal d'aménagement (1983-2002) de la forêt domaniale de Chichilianne (rapport), Service départemental R.T.M. de l'Isère, Grenoble, 40 p.

R.T.M., 1986. Proces-verbal d'aménagement (1987-2011) de la forêt domaniale de Chantelouve (rapport), Service départemental R.T.M. de l'Isère, Grenoble.

R.T.M., 2003. Révision d'aménagement (2003-2022) de la forêt domaniale de Chichilianne (rapport), Service départemental R.T.M. de l'Isère, Grenoble.

Ramousse, R., Le Berre, M. et Le Guelte, L., 2004. Statistique, http://socio-eco5.univ-lyon1.fr/enseignement/stat/St.html

Rapp, A. et Nyberg, R., 1981. Alpine debris flows in Northern Scandinavia. Geogr. Ann., 63A: 183-196.

Reid, L. et Dunne, T., 1996. Rapid evaluation of sediment budgets. Geoecology paperbook, Catena Verlag, 164 p.

Remaître, A., Maquaire, O. et Pierre, S., 2002. Analyse d'une lave torrentielle dans le torrent de Faucon (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence). Détermination des zones de déclenchement et de contribution - Study of a debris flow event in the Faucon stream (Barcelonnette basin, Alpes-de-Haute-Provence). Determination of triggering areas and contribution areas. Géomorphologie : relief, processus, environnement(1): 71-84.

Rey, F., 2003. Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies. Catena, 50: 549-562.

Rey, F., Ballais, J.-L., Marre, A. et Rovéra, G., 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. Comptes Rendus Géoscience, 336(11): 991-998.

Richard, D., 1996. Les torrents à laves torrentielles dans les départements alpins, Situations génératrices - essai de typologie (rapport), Cémagref - Ministère de l'Environnement, Grenoble, 53 p.

Richard, D. et Mathys, N., 1997. Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi. In: Cemagref (editor), Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne (conference proceedings), Digne, pp. 11-28.

Rickenmann, D., 1991. Bed load transport and hyperconcentrated flow at steep slopes. In: A. Armanini et G. DiSilvio (editors), International workshop on fluvial hydraulics on mountains regions (conference proceedings). Springer-Verlag Berlin, Trent - Italie, pp. 429-441.

Rickenmann, D., 1997a. Estimation des laves torrentielles. IAS, n°19: 386-391.

Rickenmann, D., 1997b. Méthodes empiriques pour l'estimation des laves torrentielles, Risques torrentiels: érosion et crues, Université Européenne d'Eté sur les Risques Naturels (conference proceedings).

Rickenmann, D. et Zimmermann, M., 1993. The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. Geomorphology, 8: 175-189.

Rodolfo, K.S. et Arguden, A.T., 1991. Rain-lahar generation and sediment-delivery systems at Mayon volcano. In: R.V. Fisher et G. Smith (editors), Sedimentation in Volcanic Settings (conference proceedings). SEPM Special publication, pp. 71-87.

Rogers, R.D. et Schumm, S.A., 1991. The effect of sparse vegetative cover on erosion and sediment yield. Journal of Hydrology, 123: 19-24.

Roose, E. et Bertrand, R., 1971. Contribution à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt pour lutter contre l'érosion hydrique en Afrique de l'Ouest - Résultats expérimentaux et observations sur le terrain. L'Agronomie Tropicale, 26: 1270-1283.

Rooseboom, A. et Lotriet, H.H., 1992. The new sediment yield map for the southern Africa, Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins (conference proceedings). IAHS, Proceedings of the Oslo Symposium, pp. 527-538.

Rovéra, G., 1997. L'éboulisation des corniches de calcaire urgonien dans le massif de la Grande Chartreuse (Alpes du Nord). Environnements périglaciaires, N°4: 13-27.

Rovéra, G., Robert, Y., Coubat, M. et Nedjaï, R., 1999. Erosion et stades biorhexistasiques dans les ravines du Saignon (Alpes de Provence) ; essai de modélisation statistique des vitesses d'érosion sur marnes. Etudes de Géographie Physique, 28: 109-115.

Rutherfurd, I.D., Bishop, P. et Loffler, T., 1994. Debris flows in northestern Victoria, Autralia: occurence and effects on the fluvial system. In: L.J. Olive, R.J. Loughran et J.A. Kesby (editors), stream erosion and sediment transport (conference proceedings). IAHS, Wallingford, UK, pp. 359-369.

S.A.G.E., 1993. Etude des potentilités d'extraction dans les dépôts du Manival (38). 792 (rapport), Gières, 11 p.

Saunders, I. et Young, A., 1983. Rates of surface processes on slopes, slope retreat and denudation. Earth Surface Processes, 8: 473-501.

Sauret, B., 1987. Coulées boueuses. Laves torrentielles. 1- Coulées de débris canalisées. Compte rendu bibliographique. Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussés, 150/151: 65-77.

Scheidegger, A.E., 1975. Physical aspects of natural catastrophes, Elsevier, Amsterdam, 289 p.

Schmidt, K.H., 1994. River channel adjustment and sediment budget in response to a catastrophic flood event (Lainbach catchment, southern Bavaria). Lecture Notes in Earth Sciences, 52.

Schmidt, K.H. et Ergenzinger, P., 1992. Bedload entrainment, travel lengths, step lengths, rest periods-studied with passive (iron, magnetic) and active (radio) tracer techniques. Earth Surface Processes and Landforms, 17(John Wiley & Sons): 147-165.

Schumm, S.A., 1973. Geomorphic thresholds and complex response of drainage systems. In: Fluvial Geomorphology, Morisawa (Editor), G. Allen et unwin Ltd., London, pp. 299-310.

Schumm, S.A., 1977. The fluvial system, Wiley-Interscience, New-York, 338 p.

Schumm, S.A. et Lichty, R.W., 1965. Time, space, and causality in geomorphology. American Journal of Science, 263: 110-119.

Scott, P.J., 1978. Structural deformation measurement of a model box girder bridge. Photogrammetric Journal, 20: 329-335.

Selby, M.J., 1993. Hillslope materials and processes, Oxford Univ. Press, 451 p.

Sharp, R.P., 1942. Mudflow levees. J. Geomorphol., 5(3): 222-227.

Sharp, R.P. et Nobles, L.H., 1953. Mudflow of 1941 at Wrightwood (Soutern California). Geological Society of American Bulletin, 64: 227-247.

Shaw, J. et KellerHals, E.B., 1977. Paleohydraulic interpretation of antidune bedforms with application to antidunes in gravel. Journal of Sedimentary Petrology, 47(1).

Shieh, C.-l. et Tsai, Y.-F., 1997. Experimental study on the configuration of debris-flow fan. In: C.-l. Chen (editor), Debris -Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). ASCE, Hyatt Regency San Francisco, California, pp. 133-152.

Shreve, R.L., 1966. Statistical law of stream numbers. Journal of Geology, 74: 17-37.

Simon, L., 1986. Transport solide de sédiments de granulométrie non uniforme. Mémoire de DEA, Chatou.

Slama, C.C., 1980. The manual of photogrammetry. Fourth, American Society of Photogrammetry, 292 p.

Small, R.J., Beecroft, I.R. et Stirling, D.M., 1984. Rates of deposition on lateral moraine embankments, Glacier de Tsidjiore Nouve, Valais, Switzerland. Journal of Glaciologie, 30: 175-281.

Smith, G.A. et Fritz, W.J., 1989. Penrose Conference report : Volcanic influences on terrestrial sedimentation. Geology, 17: 376.

Smith, G.A. et Lowe, D.R., 1991. Lahars : volcano-hydrologic events and deposition in the debris-flow-hyperconcentrated flow continuum. In: Sedimentation in Volcanic Setting, R.V. Fisher et G. Smith (Editors), SEPM Special Publication, pp. 59-70.

Southard, J.B., Smith, N.D. et Kuhnle, R.A., 1984. Chutes and lobes: newly identified elements of braiding in shallow gravelly streams. In: E.H. Koster et R.J. Steel (editors), Sedimentology of gravels and conglomerates (conference proceedings). Canadian Society of Petroleum Geologist, pp. 51-59.

Spreafico, M. et Lehmann, C., 1994. Sediment transport observations in Switzerland, Canberra Symposium (conference proceedings). IAHS, pp. 259-268.

Spreafico, M., Lehmann, C. et Naef, O., 1996. Empfehlung zur Abschätzung von Feststoffrachten in Wildbächen. Communication n°4, Teil I, Service hydrologique et géologique national, Bern, 46 p.

Stefanini, M.C. et Ribolini, A., 2003. Dendrogeomorphological investigations of debris-flow occurence in the Maritime Alps (northwestern Italy). In: R. Dieter et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress, Davos, pp. 231-242.

Stevens, D., McKay, W.M. et May, M.R., 1992. Topographic surveying: the Jubilee Line extension survey. Photogrammetric Record, 14(79): 85-98.

Stiny, P.J., 1910. Debris Flows - An attempted monograph with particular reference to the conditions in the Tyrolean Alps, Innsbruck, 105 p.

Stoffel, M., Gärtner, H., Lièvre, I. et Monbaron, M., 2003. Comparison of reconstructed debris-flow event years (Ritigraben, Switzerland) and existing flooding data in neighboring rivers. In: R. Dieter et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress, Davos, pp. 243-253.

Stojic, M., Chandler, J.H., Ashmore, P.E. et Luce, J., 1998. The assessment of sediment transport rates by automated digital photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 64: 387-395.

Stott, T., 1997. Forestry effects on bedload yields in mountain streams. Applied Geography, 17(1): 55-78.

Strahler, A.N., 1950. Equilibrum theory of slopes approached by frequency distribution analysis. Am. J. Sci., 248: 800-814.

Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans. American Geophys. Union, 38(6): 913-920.

Strunk, H., 1992. Reconstructing debris flow frequency in the southern Alps back to AD 1500 using dendrochronological analysis. IAHS, n°209: 299-306.

Stüve, P.E., 1990. Spatial and temporal variation of flow resistance in an Alpine river. IAHS Hydrology in mountainous region I, 193: 307-314.

Surell, A., 1841. Etude sur les torrents des Alpes, Dunod, Paris, 317 p.

Sutherland, R.A., 1996. Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference locations: a litterature survey. Hydrological Process, Vol.10: 43-53.

Suwa, H., Okuda, S. et Yokoyama, K., 1973. Observation system on rocky mudflow. Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Univ., 23(213 Parts 3-4): 59-74.

Suwa, H., Yamakoshi, T. et Sato, K., 2000. Relationship between debris-flow discharge and ground vibration. In: G.F.W.N.D. Naeser (editor), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Balkema, Taipei, Taiwan, pp. 311-318.

Suzuki, K. et Kato, K., 1989. Mobile armoring of the bed surface in a steep sloped river with gravel and sand mixture, International Workshop on fluvial hydraulics of mountains regions (conference proceedings), Trent - Italie.

Swanson, F.J. et al., 1987. Mass failures and other processes of sediment production in Pacific Northwest forest landscapes. In: E.O. Salo et T.W. Cundy (editors), Streamside management: forestry and fishery implications (conference proceedings). University of Washington, Institute of Forest Resources, pp. 9-38.

Takahashi, T., 1978. Mechanical characteristics of debris flow. J. Hydr. Div., ASCE 106: 381-396.

Takahashi, T., 1981. Debris flow. Annual Review of Fluid Mechanics, 13: 57-77.

Takahashi, T., 1987. High velocity flow in steep erodible channels, Proc. 22th IAHR Congress (conference proceedings). Techn. Session A, Lausanne, pp. 42-53.

Takei, A., 1984. Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system, Internationales Symposion Interpraevent (conference proceedings), Villach, Austria, pp. 35-48.

Tavernier, P.-A., 2005. Crues et laves torrentielles en Maurienne : les cas de la Ravoire, du St-Julien, du Charmaix et de l'Envers. TER Master 1, Université Savoie, Chambéry, 96 p.

Theys, J. et Fabiani, J.L., 1988. La société vulnérable, Presse de l'Ecole Normale Supérieure, Paris, 674 p.

Thouret, J.-C., Vivian, H. et Fabre, D., 1995. Instabilité morphodynamique d'un bassin versant alpin et simulation d'une crise érosive (L'Eglise-Arc 1800, Tarentaise). Bull. Soc. Géol. Fr., t. 166, n°5: 587-600.

Tobler, W.R., 1986. Pseudo cartograms. The american cartographer, 13(1): 43-50.

Tognacca, C. et Bezzola, G.R., 1997. Debris flow Initiation by Channel-Bed Failure. In: Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, C.-l. Chen (Editor), pp. 44-53.

Tognacca, C., Bezzola, G.R. et Minor, H.E., 2000. Threshold criterion for debris-flow initiation due to channel-bed failure. In: Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, W. Naeser (Editor), Balkema, Roterdam, pp. 44-53.

Tribe, A., 1991. Automated recognition of valley heads from digital elevation models. Earth Surface Processes and Landforms, 16: 33-49.

Tricart, J., 1957. Une lave torrentielle dans les Alpes autrichienne. Revue de Géomorphologie dynamique, 8: 161-168.

Tricart, J., 1960. Mécanismes normaux et phénomènes catastrophiques dans l'évolution des versants du bassin du Guil (Hautes-Alpes, France). Zeitschrift für Geomorphologie, 5/4: 227-301.

Tricart, J., 1974. Phénomènes démesurés et régime permanent dans les bassins montagnards (Queyras et Ubaye, Alpes françaises). Revue de Géomorphologie Dynamique, 3: 99-114.

Tricart, J., 1977. Précis de géomorphologie: géomorphologie dynamique générale, Sédes, Paris, 345 p.

Trimble, S., 1981. Changes in sediment storage in the Coon Creek basin, Drittley Area, Wisconsin, 1853-1975. Science, 214: 181-183.

Turconi, L. et Tropeano, D., 1999. Evaluation of the potential debris supply in some catchments of the western and central Italian Alps. Wildbach- und Lawinenverbau, 63 Jahrgang Heft 140: 37-46.

Van Dine, D.F., 1985. Debris flow and debris torrents in the southern Canadian Cordillera. Canadian Geotechnical Journal, 22: 44-68.

Van Ghelue, P. et Van Molle, M., 1990. Geomorphological mapping as tool in the delineation of erosion risk zones in the Rio Guadalhorce catchment (Spain). Soil Technology, Vol. 3: 327-342.

Van Steijn, H., 1996. Debris-flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of Central and Northwest Europe. Geomorphology, 15: 259-273.

Van Steijn, H., De Ruig, J. et Hoozemans, F., 1988. Morphogical and mecanical aspects of debris flows in part of the French Alps. Z. Geomorph. N. F., 32 - 2: 143-161.

VanDine, D.F., 1985. Debris flows and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera. Can. Geotch., 22: 44-68.

VanDine, D.F., 2000. Bibliography: Canadian subaerial channelized debris flows (rapport), VanDine Geological Engineering Limited, 66 p.

Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. Landslides analysis and control: 11-33.

Vautier, F., 2000. Dynamique géomorphologique et végétalisation des cours d'eau endigués: l'exemple de l'Isère dans le Grésivaudan. Thèse de doctorat, Université Université Joseph Fourier, Grenoble, 376 p.

Veldhuis, H. et Vosselman, G., 1998. The 3D reconstruction of straght and curved pipes using digital line photogrammetry. Journal of Photogrammetry and Remote sensing, 53: 6-16.

Veress, S.A., Jackson, N.C. et Hatzopoulos, J.N., 1980. Monitoring a gabion wall by inclinometer and photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46: 771-778.

Veyrat-Charvillon, S., 1998. Etude de la répartition des concentrations de Matières En Suspension sur une section de l'Isère (station de Grenoble - Campus). DEA Gestion des Espaces Montagnards, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, Grenoble, 45 p.

Veyrat-Charvillon, S., 2000. Rôle des processus saisonniers de recharge sédimentaire dans la production de matériaux des événements torrentiels : mesures expérimentales dans la gorge du Manival (Isère, Alpes du Nord), Géomorphologie et Risques Naturels (conference proceedings), Lille, France, pp. 1 (abstract).

Veyrat-Charvillon, S. et Mémier, M., 2005. The use of archive data by stereophotogrammetry with a topographic methodology of debris-flow torrent measurements: calculation of channel sediment states and partial sediment budget on Manival torrent (Isère, France). Earth Surface Processes and Landforms, à paraître.

VWHG-ETH Zürich, 1988. Folgen der Waldschäden auf die Gebirgsgewässer in der Schweiz (rapport), Workshop 1987.

Waldron, H.H., 1967. Debris flow and erosion control problems caused by the ash eruptions of Irazu volcano (Costa Rica). U. S. Geol. Surv. Bull., 1241(I).

Walling, D.E. et Quine, T.A., 1992. The use of caesium-137 measurements in erosion surveys. IAHS, Publ. n°210(J. Bogen, D.E. Walling & T. Day): 143-152.

Wasson, R.J., 1978. A debris flow at Reshun (Pakistan). Geog. Ann., 60(A): 151-159.

Watters, R.J., 1983. A landslide induce water flood-debris flow. Bull. Ass. Int. Geol. Ing., 28: 178-182.

Waythomas, C.F. et Jarrett, R.D., 1994. Flood geomorphology of Arthurs Rock Gulch, Colorado: paleoflood history. Geomorphology, 11: 15-40.

Westaway, R.M., Lane, N.S. et Hicks, D.M., 2000. The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers. Earth Surface Processes and Landforms, 25: 209-226.

Whipple, K.X. et Dunne, T., 1992. The influence of debris-flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California. Geological Society of America Bulletin, 104: 887-900.

White, C.S. et Loftin, S.R., 2000. Response of 2 semiarid grasslands to cool-season prescribed fire. Journal of Range Management, 53: 52-61.

White, S. et al., 1997. The 1996 Biescas campsite disaster in the central spanish Pyrenees, and its temporal and spatial context. Hydrological Processes, 11: 1797-1812.

White, S.M., 1989. Sediment yield assessment using a geographical information system, fourth International Symposium on River sedimentation (conference proceedings), Beijing, China, pp. 239-245.

Whittaker, J.G. et Jaeggi, N.R., 1982. Origin of step-pool systems in moutain streams. Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 108(HY6): 758-773.

Wickens, E.H. et Barton, N.R., 1971. The application of photogrammetry to the stability of excavated rock slopes. Photogrammetric Record, 7: 46-54.

Wicks, J.M. et Bathurst, J.C., 1996. SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. Journal of Hydrology, 175(1-4): 213-238.

Wieczorek, G.F., Lips, E.W. et Ellen, S.D., 1989. Debris flow and hyperconcentrated floods along the Wasatch Front, Utah, 1983 and 1984. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 26: 191-208.

Williams, G.P. et Wolman, M.G., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. United States Geological Survey Professional Paper, 1286.

Winder, C.G., 1965. Alluvial cone construction by alpine mudflow in a humid temperate region. Canadian Journal of Earth Sciences, 2: 270-277.

Wohl, E., 2000. Mountain rivers. Water Ressources Monograph 14. American Geophysical Union, AGU Books Board, Washington, 320 p.

Wohl, E. et Pearthree, P.A., 1991. Debris flows as geomorphic agents in the Huachuca Mountains of southeastern Arizona. Geomorphology(4): 273-292.

Yang, C.T., 1989. Advance course on fluvial and sediment hydraulics, I.R.T.C.E.S., Beijing.

Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M.T., Leoni, F.M. et Santacroce, R., 2004. Characteristics of May 5-6,1998 volcaniclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 133: 377-393.

Zaruba, Q. et Mencl, V., 1976. Engineering geology. Developement in geotechnical engineering, 504 p.

Zeller, J., 1976. Schutz vor Hochwasserschäden und Rutschungen im Gebirge; ein Überblick. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 127(Berichte n°153 EAV Birmensdorf): 129-137.

Zhang, S. et Chen, J., 2003. Measurement of debris-flow surface characteristics through close-range photogrammetry. In: R. Dieter et C.-l. Chen (editors), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (conference proceedings). Millpress, Davos, pp. 775-784.

Zhizhuo, W., 1996. On the renaming of the discipline photogrammetry. Journal of Photogrammetry and Remote sensing, 51: 1-4.

Zicheng, K. et Jing, L., 1987. Erosion processes and effects of debris flows. In: R.L. Beschta, T. Blinn, G.E. Grant, G.G. Ice et F.J. Swanson (editors), Erosion and sedimentation in the Pacific Rim (conference proceedings), pp. 233-242.

Zimmermann, M. et Haeberli, W., 1992. Climatic change and debris flow activity in high-moutain areas - a case study in the Swiss Alps. Catena Supplement, 22: 59-72.

Zimmermann, M. et al., 1997. Murganggefhar und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz: Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag AG, Zürich.

Zimmermann, M., Mani, P. et Kienholz, H., 1996. Debris Flows, Environment Research Program, Contract EV5V-CT94 ("Climatology and Natural Hazards"), ARMINES, Paris.

Liste des Figures

Figure 1-1 *"Idealized fluvial system" (d'après Schumm, 1977, p.3) et exemple d'un bassin versant torrentiel de Maurienne (Savoie, France) (cliché S.V-C.)* 24

Figure 1-2 *Classification des différents types de cours d'eau selon des critères hydrauliques et sédimentaires (d'après Besson, 1995, p.78)* 28

Figure 1-3 *Distinction entre les processus de transports solides des rivières et ceux des torrents (* le processus de charriage des torrents regroupe la suspension, la saltation et le charriage des rivières)* 29

Figure 1-4 *Schématisation des phénomènes torrentiels (d'après Meunier, 1991, modif.)* 33

Figure 1-5 *Croquis d'écoulements torrentiels (d'après Demontzey, 1894)* 35

Figure 1-6 *Les zones morphologiques caractéristiques des laves torrentielles (d'après Bardou, 2002). Remarquez l'emplacement des plus gros blocs situés préférentiellement sur la partie externe des bourrelets et flottant en surface dans l'écoulement* 36

Figure 1-7 *Passage du front du lahar du 19 janvier 2001 dans la Curah Lengkong sur les flancs du volcan Semeru (île de Java, Indonésie). Au niveau du seuil en béton où la largeur du chenal est de 33 mètres, la hauteur maximale a été de 4,5 mètres. Les lettres indiquent l'ordre chronologique de progression du lahar (clichés F.Lavigne et S.V-C.)* 38

Figure 1-8 *Schématisation d'une forme en marche d'escalier (seuils-mouilles) dans un système fluvial torrentiel (d'après Whittaker et Jaeggi, 1982)* 40

Figure 1-9 *Dunes à fortes pentes. A gauche, dune de grande ampleur lors d'un essai en canal de laboratoire (plate-forme Sogreah) ; à droite, reste probable d'une dune sur le cône de dépôt du Rabioux de Châteauroux (affluent de la Durance en amont d'Embrun, Hautes-Alpes) (clichés V.Koulinski)* 41

Figure 1-10 *Les différentes phases du passage d'une lave torrentielle, en coupe et en plan, montrant les différentes formes associées (Bardou, 2002)* 43

Figure 1-11 *Formes caractéristiques du chenal à laves torrentielles, avec un profil en travers en "auge": représentation schématique (LeMéhauté, 2000), et exemples du chenal du Manival en aval du barrage RTM n°30 et de la baraque forestière (clichés S.V-C.)* 43

Figure 1-12 *A, B, C, utilisation du modèle rhéologique de Bingham dans un chenal à section rectangulaire et adaptation à une section triangulaire ; 1, 2, 3, modélisation d'une succession d'événements créant de multiples levées latérales (d'après Johnson, 1970)* 45

Figure 1-13 *Exemples de formes liées aux transports sédimentaires par laves torrentielles et par charriage, en surface (a. à e.) et à l'intérieur du dépôt (coupes f. et g.). On peut observer des dépôts de micro-laves torrentielles en forme de lobes (a. à d.) et la mise en place d'un pavage par le remaniement des matériaux sous forme de charriage (d. et e.). Les coupes montrent l'intérieur de dépôts de laves torrentielles (f. et partie haute de g.) contrastant avec les dépôts d'écoulement fluviatile (partie basse de g.) (Clichés S.V-C.)* 47

Figure 1-14 *Représentation théorique de la réponse fluviale à une modification brutale d'une variable de contrôle (d'après Knighton, 1998)* 49

Figure 1-15 *Echelles spatiales et temporelles de l'ajustement des formes fluviales (d'après Knighton, 1998)* 49

Figure 1-16 *Représentation graphique du concept de stabilité du système torrentiel (d'après Schumm, 1973 et Heward, 1978, modif.)* 51

Figure 1-17 *Concepts d'occurence des laves torrentielles en fonction du dépassement d'un seuil extrinsèque hydrométéorologique (A) ou d'un seuil intrinsèque géomorphologique (B). Les barres indiquent les événements hydrométéorologiques et la courbe représente la recharge sédimentaire (d'après Bovis et Jakob, 1999)* 54

Figure 1-18 *Le seul modèle global élaboré en France (Alpes du Nord) ne présente pas de relation statistique significative avec la réalité (Brochot et al., 2000b)* 62

Figure 1-19 *Situation du torrent du Manival* 70

Figure 1-20 *Le bassin versant du Manival (photographie aérienne orthorectifiée). CD30 représente le barrage RTM n°30* 71

Figure 1-21 *Le bassin du Manival, qui entaille l'anticlinal de Perquelin (a.P), est parcouru de plusieurs failles : principalement la faille du Baure (ΦB), mais aussi la faille du Manival (ΦM) et une faille de chevauchement (ΦC) (d'après Gidon, 2004)* 72

Figure 1-22 *Représentation simplifiée de la faille de chevauchement du Bec Charvet et des différentes strates géologiques du bassin de réception du torrent du Manival (d'après Gidon, 2004)* 72

Figure 1-23 *Evolution du bassin versant du Manival entre 1904 et 2000. Autrefois les matériaux du torrent s'étalaient plus bas sur le cône de déjection, alors que les cultures (vignes, céréales) remontaient bien plus en amont qu'actuellement (Blanc et Perrard, 1998)* 73

Figure 1-24 *Barrages et seuils de correction torrentielle sur le chenal du Manival et ses ravins affluents (clichés S.V-C.)* 75

Figure 1-25 *Le profil en long affouillé par érosion régressive (a) est stabilisé par une série de seuils (b) (d'après Besson, 1996)* 75

Figure 1-26 *Localisation des ouvrages RTM du chenal du Manival (la baraque forestière est située en rive gauche au niveau du barrage RTM N°30* 77

Figure 1-27 *Vues de la plage de dépôt du Manival d'une capacité d'environ 25 000 m^3 (clichés S.V-C.)* 78

Figure 1-28 *Evolution délicate dans des terrains souvent dangereux... (Clichés S.V-C.)* 79

Figure 2-1 *Principe de mesure photogrammétrique par stéréoscopie sur un restituteur numérique en fonction de la parallaxe linéaire (Px)* 91

Figure 2-2	*Rotations de l'engin de vol en terme de roulis, tangage et lacet, et les déformations engendrées sur les prises de vues*	*92*
Figure 2-3	*Répartition des points de parallaxe sur la bande de recouvrement d'un couple de photographie du bassin versant du Manival, permettant l'élaboration de l'orientation relative (chaque point de parallaxe doit pointer le même objet sur chacune des deux photographies)*	*93*
Figure 2-4	*Fichier caméra (.cam) comprenant les coordonnées du centre optique (XC, YC, et focale P en mm), les 3 coefficients de distorsion, le nombre de repères, et les coordonnées des repères de fond de chambre en mm*	*97*
Figure 2-5	*Le fichier modèle de base (.mdl) utilisé pour la mission de 1993. Il est important de regarder les écarts (résidus en mètre) sur les points utilisés, qui sont un indicateur de l'erreur (en gras)*	*98*
Figure 2-6	*Fichier des points d'appui (.app) comportant le numéro du point, son code (altimétrique et/ou planimétrique), et ses coordonnées X, Y et Z*	*99*
Figure 2-7	*Mesures DGPS (Differential Global Positioning System) sur le secteur du Manival. A gauche, la station "permanente" et à droite, le récepteur mobile (Clichés S.V-C.)*	*100*
Figure 2-8	*Localisation des points ayant permis le calage du couple photographique de référence (1993)(**Cf. Fig. 2-5**) pour les mesures photogrammétriques du bassin versant du Manival (en trait noir)*	*101*
Figure 2-9	*Représentation schématique des erreurs du modèle pour le couple de photographies de 1970 en fonction du choix des points de calage : a. avec une référence terrain, b. avec une référence au couple de 1993. Pour notre étude où le but est de comparer deux dates, le cas b est toujours préférable puisqu'il réduit les erreurs entre dates, même si le cas a. donne un modèle plus proche du terrain*	*102*
Figure 2-10	*Répartition des fréquences sur les écarts de mesure des points durs du profil en long et courbe de Gauss (sigma représente l'écart-type ou RMSE ; et N, l'effectif total)*	*104*
Figure 2-11	*Ecarts en altitude des différentes mesures corrigées (par rapport aux mesures de 1993) sur les points durs du profil en long (écart-type = 0,77)*	*105*
Figure 2-12	*Méthode utilisée pour réduire l'erreur altitudinale : exemple des mesures de 1998. Dans un premier temps, une courbe polynomiale est calculée par la méthode des moindres carrés sur les points fixes du profil en long (A) ; ensuite cette courbe permet d'appliquer un ajustement à toutes les valeurs mesurées du profil en long (B) réduisant ainsi l'erreur d'environ 34% (C). La précision des mesures (en écart-type) est alors submétrique (Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005)*	*106*
Figure 2-13	*Matériel de mesure topographique utilisé dans le chenal torrentiel : télémètre laser Impulse et boussole électronique Mapstar sur trépied (Cliché S.V-C.)*	*108*
Figure 2-14	*Mesures des outils topométriques de terrain utilisés (télémètre laser et boussole électronique)*	*108*
Figure 2-15	*Erreurs de mesure en distance (Err) relativement importantes induites par de faibles variations d'angles (ε), en haut ; et en fonction de la rugosité si l'on n'utilise pas de cible réhaussée, en bas*	*109*
Figure 2-16	*Cheminement topographique simplifié et calculs trigonométriques de coordonnées*	*111*
Figure 2-17	*Répartition de l'échantillonnage des points de mesure dans le cas d'une forme linéaire telle qu'un torrent (Le Méhauté, 2000)*	*113*
Figure 2-18	*Echantillonnage dense de 19 points de mesures topographiques par transect sur la base d'un profil en travers regroupant un grand nombre de formes torrentielles caractéristiques*	*115*
Figure 2-19	*Exemple de mauvaise représentation dû à une répartition non-homogène des points de mesure (Le Méhauté, 2000)*	*116*
Figure 2-20	*Restitution numérique d'une forme fictive représentant un tronçon rectiligne de chenal torrentiel en fonction de différentes méthodes d'interpolations : la triangulation (à gauche) est beaucoup plus représentative que les autres méthodes (à droite) (d'après Le Méhauté, 2000)*	*117*
Figure 2-21	*Difficulté de restitution des formes du chenal torrentiel dans les parties courbes (interpolation par triangulation)*	*118*
Figure 2-22	*Forme du Profil en Travers d'Ablation (PTA) maximale lors du passage d'une lave torrentielle extrême. Les berges sont alors verticales et le niveau du fond est déterminé par les Profils en Long d'Ablation de Niveau supérieur et inférieur (PLAN sup. et PLAN inf.)*	*120*
Figure 2-23	*Deux hypothèses de niveaux de référence du fond : a. PLAN sup., une hypothèse minimaliste correspondant à une pente d'équilibre ou de compensation (profil a), b. PLAN inf., une hypothèse maximaliste (profil c) en fonction des pentes observées dans des conditions de fort déficit sédimentaire (profil b)*	*123*
Figure 2-24	*Représentation schématique de la pente d'érosion maximale observable en situation de déficit sédimentaire extrême. Les valeurs correspondent au torrent du Manival, avec Qs, le débit solide*	*123*
Figure 2-25	*Prospection géophysique (sismique réfraction et sondage électrique) dans la partie aval du ravin du Manival (Clichés S.V-C.)*	*125*
Figure 2-26	*Profils sismiques dans le chenal du Manival entre les seuils RTM n°2 (B2) et n°9 (B9) en 2000*	*126*
Figure 2-27	*Profil d'ablation maximum observé (PLAN obs.) en trait plein, dérivé des mesures de profils en long effectuées par photogrammétrie sur les photographies aériennes d'archives de 1963 à 2000 (l'incertitude (T) est d'environ 2,4 mètres, soit +3 écarts-types)*	*128*
Figure 2-28	*Les types extrêmes de formes de profils en travers dans le chenal à lave torrentielle ; a. transect érodé (concave vers le haut), b. transect accumulé (convexe vers le haut)*	*128*
Figure 2-29	*Répartition des transects en cinq types de formes et trois groupes principaux*	*130*

Figure 2-30 *Calcul de l'aire de la section mobilisable : a. méthode des trapèzes à partir de nombreux points de mesures, b. modélisation à partir de quatre points de mesure en calculant l'intégrale entre la courbe polynomiale de puissance deux selon la méthode des moindres carrés et la hauteur dz* 131

Figure 2-31 *Corrélation entre la mesure directe de l'aire de la section mobilisable au droit de chaque profil en travers (sur le MNT détaillé représentant très précisément le terrain) et la modélisation à partir de 4 points de mesures judicieusement choisis sur le profil en travers* 132

Figure 2-32 *Répartition des écarts entre hauteurs moyennes réelles et hauteurs moyennes modélisées des sections mobilisables suivant une loi normale* 134

Figure 2-33 *Test sur les résidus de la hauteur moyenne calculée* 135

Figure 2-34 *Impact de l'équidistance des transects sur l'estimation des volumes (en pointillés réguliers, utilisation de transects mesurés sur des seuils artificiels en béton ; en pointillés irréguliers, valeurs retenues)* 136

Figure 2-35 *Echantillonnage des mesures topographiques et principe de calcul sous forme de casiers sédimentaires des volumes de matériaux potentiellement mobilisables* 138

Figure 2-36 *Organigramme de la méthode de calcul de l'état sédimentaire potentiel du chenal torrentiel* 141

Figure 3-1 *Volumes de sédiments potentiellement disponibles dans le chenal du Manival en fonction des différentes hypothèses d'ablation maximale par une lave torrentielle (PLAN sup. et PLAN inf.)* 149

Figure 3-2 *Volumes potentiels de sédiments du chenal du Manival en 1993 en fonction des hypothèses du niveau d'ablation maximum, de gauche à droite : PLAN sup., médiane, PLAN inf.* 151

Figure 3-3 *Représentation des volumes bruts stockés dans le chenal du Manival pour onze dates de 1963 à 2000, en fonction de ceux calculés pour 1993 (0 représente l'année 1993)* 152

Figure 3-4 *Représentation des volumes spécifiques et cumulés stockés dans le chenal du Manival pour onze dates de 1963 à 2000, en fonction de ceux calculés pour 1993* 153

Figure 3-5 *Evolution temporelle des volumes de matériaux du chenal par casiers sédimentaires. La période de 1963-2000 représente le cumul des valeurs négatives (à gauche) et des valeurs positives (à droite) de chaque casier* 155

Figure 3-6 *Evolution temporelle des volumes moyens annuels de matériaux du chenal par casiers sédimentaires. La période 1963-2000 représente le cumul des valeurs négatives (à gauche) et des valeurs positives (à droite) de chaque casier* 156

Figure 3-7 *Evolution temporelle des volumes spécifiques, ou d'épaisseur moyenne, de matériaux du chenal par casiers sédimentaires. La période 1963-2000 représente le cumul des valeurs négatives (à gauche) et des valeurs positives (à droite) de chaque casier* 157

Figure 3-8 *Définition de l'amplitude et schéma explicatif de calcul* 158

Figure 3-9 *Amplitudes spécifiques de chaque bief du chenal du Manival représentées graphiquement (à gauche) et cartographiquement (à droite). Neuf zones d'amplitudes homogènes ont été définies* 159

Figure 3-10 *Evolution des volumes de sédiments accumulés dans le chenal découpé en 9 zones d'amplitudes homogènes ; A : volumes bruts, B : valeurs spécifiques correspondant à une épaisseur moyenne de matériaux* 160

Figure 3-11 *Evolution dans le temps des 9 zones du chenal du Manival d'amplitudes homogènes en fonction des volumes spécifiques relatifs (en pointillé) d'après les dates étudiées (losanges) ; en trait plein, les mêmes valeurs cumulées et entre parenthèses, la variation maximale pour 100 m linéaires* 161

Figure 3-12 *Clé de détermination de classes pour une cartographie fonctionnelle des zones de production sédimentaire d'un bassin versant torrentiel (en pointillés, processus géomorphologiques peu visibles) (d'après Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005)* 166

Figure 3-13 *Quelques exemples des classes de la cartographie fonctionnelle des zones de production sédimentaire d'un bassin versant torrentiel (Cf. Fig. 3-12) (Clichés S.V-C.)* 168

Figure 3-14 *Méthode de calcul de la cartographie anamorphosée. Les nouvelles coordonnées sont déterminées en fonction d'une direction et de la distance réelle de surface, par rapport au chenal* 170

Figure 3-15 *Représentation anamorphosée des zones de production du bassin versant du Manival et de leurs contributions relatives dans la recharge sédimentaire du chenal (B) (**Cf. Fig. 3-12 qui sert de légende**). La zone de production principale située sous le Bec Charvet, en forte pente (A), est ainsi mieux représentée que sur une carte classique (projection sur un plan horizontale) (Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005) (Clichés S.V-C.)* 171

Figure 3-16 *Localisation du site d'étude du Haut-Ravin du Manival et de l'instrumentation sur une crête au coeur du bassin de réception (Cliché M.Mémier - Sintégra)* 172

Figure 3-17 *Site de mesure du Haut-Ravin du Manival et appareillage (télémètre laser et boussole électronique, pluviographe) placé sur la crête distante d'environ 50 m. Le 13 juillet 1999, les matériaux accumulés dans le talweg recouvraient un névé conséquent qui a fondu complètement à la fin du mois d'août (Clichés S.V-C.)* 174

Figure 3-18 *Traitement des mesures du 18 août 1999 à l'aide du logiciel Surfer dans le ravin du Manival. Le Modèle Numérique de Terrain permet d'effectuer une carte topographique (en haut), des transects (à droite), une représentation 3D (en bas à gauche), ou encore une carte des pentes (en bas à droite)* 175

Figure 3-19 *Graphique synthétique de l'étude du ravin du Manival montrant l'évolution du volume sédimentaire de la zone (env. 1000 m²) et les précipitations journalières et mensuelles pour les campagnes de mesures de 1999 et 2000 (la période hivernale n'a pas été prise en compte)* 178

Figure 3-20 *Description des stations pluviométriques à proximité du Manival (sources Météo France & IGN Rando)* 179

Figure 3-21 *Corrélation non significative entre les précipitations horaires relevées au Manival durant la période de mesure (entre 1999 et 2002) et les heures correspondantes à la station du Versoud* 180

Figure 3-22	*Régressions entre les précipitations relevées au Manival et à la station du Versoud à différents pas de temps (1 jour, 10 jours, 20 jours, 1 mois), pour la période étudiée (entre 1999 et 2002)*	*180*
Figure 3-23	*Relations statistiques entre les données relevées au Manival et les stations pluviométriques avoisinantes (pas de temps mensuel)*	*181*
Figure 3-24	*Comparaison des précipitations extrêmes aux stations du Versoud et du Manival, pour la période étudiée (entre 1999 et 2002) : 16 intensités horaires les plus fortes au Manival (A) et au Versoud (B), et les jours communs aux deux stations parmi ces fortes intensités (C)*	*184*
Figure 3-25	*Courbes Pluie-Durée-Fréquence (PDF) à la station d'Eybens près de Grenoble (Graff, 2000)*	*185*
Figure 3-26	*Exemple de représentation 2D et 3D des variations de volume de la zone étudiée (haut ravin du Manival) en fonction des Modèles Numériques de Terrain : évolution de la campagne de mesures 1999*	*187*
Figure 3-27	*Corrélation non significative entre l'évolution du volume sédimentaire du haut ravin du Manival et les précipitations*	*187*
Figure 3-28	*Etat des mouvements des plus gros blocs marqués durant les périodes de mesures 1999 et 2000*	*189*
Figure 3-29	*Exemple, sur un névé, d'un bloc rocheux facilement mis en mouvement (Cliché S.V-C.)*	*190*
Figure 3-30	*Représentation de l'analyse menée sur un bassin versant torrentiel (Manival) afin de prédire le volume d'une lave torrentielle extrême. Après avoir étudié les processus-relais et les intéractions entre bassin de réception, ravin et chenal, ainsi que l'influence des facteurs hydrométéorologiques (à gauche), l'analyse des phases d'instabilité (en haut à droite) a permis d'isoler la pente en tant qu'indicateur géomorphologique principal (en bas à droite) décrit par deux indices primordiaux pour la gestion du risque torrentiel : l'état des zones de Stockage POtentiel Temporaire de Sédiment du chenal (SPOTS) et la PREdiction du Volume de l'EvéNement Torrentiel (PREVENT) (dessin de fond d'après Fischesser, 1982, modif.)*	*191*
Figure 3-31	*Les piquets rouges de 1,5 m qui ont été plantés à des profondeurs de 50 cm et de 1 m dans le tablier d'éboulis, n'ont pas été déplacés au cours de la période d'observation (1999-2003) (Cliché S.V-C.)*	*196*
Figure 3-32	*Principes de budgets sédimentaires équilibrés pour l'ensemble du bassin versant (en haut) et au niveau de secteurs fonctionnels déterminés par des zones contigües de variations sédimentaires positives ou négatives*	*199*
Figure 3-33	*Budgets sédimentaires partiels de 1963 à 2000 calculés à partir de l'évolution entre les différentes dates étudiées (Cf. pages suivantes)*	*200*
Figure 3-33	*Suite*	*201*
Figure 3-33	*Suite*	*202*
Figure 3-34	*Evolution dans le temps des 9 zones du chenal du Manival d'amplitudes homogènes en fonction des dates utilisées : certaines variations sont masquées lorsque l'on n'utilise pas toutes les dates disponibles, particulièrement dans les zones amont, plus réactives*	*204*
Figure 3-35	*Relation entre la date des missions de photographies aériennes ayant permis le calcul des volumes de sédiments stockés au sein du bassin versant du Manival, et la date des événements de lave torrentielle (Cf. Tab. 1-11). Le nombre de jours séparant l'événement des photographies contemporaines à celui-ci (entre parenthèses) donne une indication sur la qualité des bilans sédimentaires : l'idéal étant d'avoir un couple photographique avant l'événement et surtout un autre juste après (valeurs en gras)*	*205*
Figure 3-36	*Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations sous forme de neige à la station du col de Porte. Le trait plein représente la moyenne de la période, alors que les pointillés indiquent la valeur minimum et maximum*	*210*
Figure 3-37	*Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations sous forme de pluie à la station du col de Porte. Le trait plein représente la moyenne de la période, alors que les pointillés indiquent la valeur minimum et maximum*	*211*
Figure 3-38	*Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations totales (neige + pluie) à la station du col de Porte. Le trait plein représente la moyenne de la période, alors que les pointillés indiquent la valeur minimum et maximum*	*212*
Figure 3-39	*Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et le rapport entre les précipitations pluvieuses (mm) sur les précipitations neigeuses (mm) à la station du col de Porte. Le trait plein représente la moyenne de la période, alors que les pointillés indiquent la valeur minimum et maximum*	*213*
Figure 3-40	*Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations de la saison d'hiver et printemps des stations proches du Manival ; en pointillés, les données pour chaque année à la station de St-Pierre-de-Chartreuse*	*214*
Figure 3-41	*Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations durant l'été (juin-juillet-août) des stations proches du Manival ; en pointillés, les données pour chaque année à la station de St-Pierre-de-Chartreuse*	*215*
Figure 3-42	*Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations durant l'automne (septembre-octobre-novembre) des stations proches du Manival ; en pointillés, les données pour chaque année à la station de St-Pierre-de-Chartreuse*	*216*
Figure 3-43	*Relation entre les variations du stock sédimentaire dans le chenal et les précipitations annuelles à St-Pierre-de-Chartreuse ; en traits pleins, les moyennes par périodes étudiées, et en pointillés, le cumul annuel*	*218*
Figure 3-44	*Micro-laves torrentielles de faible volume (<1000 m³) et de forte fréquence, observées durant la période d'étude (1999-2003)*	*219*
Figure 3-45	*La zone de SPOTS du chenal entre le barrage RTM n°1 et 10 a une forte pente de plus de 20° mais permet pourtant une forte capacité de stockage des matériaux. Les barrages n°1 et 7 (B1 et B7) ont une hauteur totale de 7 m (Clichés RTM38 et S.V-C.)*	*222*

Figure 3-46 *Localisation des zones de SPOTS du chenal du Manival à l'aide de l'étude des résidus (différences) d'altitude du profil en long de 1993 ; en grisé, quelques barrages (et un contre-barrage) RTM caractéristiques* 224

Figure 4-1 *Situation des torrents en Isère (Alpes-du-Nord, France)* 233

Figure 4-2 *Le bassin versant du Merdarêt (photographie aérienne de 2000, mission F3335-3536 environ au 1/30 000e)* 234

Figure 4-3 *Traits géologiques de la région du torrent du Merdarêt (Gidon, 2004 ; cliché M.Lemoine)* 235

Figure 4-4 *Bassin de réception du Merdarêt où l'on peut apercevoir quelques lambeaux de végétation (Clichés S.V-C.)* 236

Figure 4-5 *Production détritique bien marquée de certaines zones du bassin de réception du Merdarêt (Clichés S.V-C.)* 239

Figure 4-6 *Le bassin versant des Arches (photographie aérienne de 1998, mission FD38 environ au 1/25 000e)* 241

Figure 4-7 *Bassin de réception des Arches composé de hautes barres rocheuses (plus de 150 m) alternant des strates de roches dures et de roches tendres (Clichés S.V-C.)* 242

Figure 4-8 *Barrage et contre-barrage de correction torrentielle dans la gorge du chenal des Arches. Le mauvais état et les blocs en bétons disloqués du contre-barrage sont bien visibles sur la photographie de gauche. Si le barrage venait à céder, il libèrerait de grandes quantités de matériaux comme le montrent les photographies de droite (Clichés S.V-C.)* 245

Figure 4-9 *Analyse des mesures effectuées sur le torrent du Merdarêt* 248

Figure 4-10 *Analyse des mesures effectuées sur le torrent des Arches* 253

Figure 4-11 *Etat des passerelles enjambants le Merdarêt et les Pâles après les laves torrentielles de 2000 (essentiellement dans le Merdarêt) et de 2001 (essentiellement dans les Pâles) (Clichés S.V-C.)* 258

Liste des Tableaux

Tableau 1-1	*Quelques cas de catastrophes torrentielles*	*22*
Tableau 1-2	*Volumes mobilisés par les "coulées de débris" (en un seul événement) d'après divers auteurs (in Sauret, 1987)*	*25*
Tableau 1-3	*Quelques exemples de définition du torrent (in Liébaut, 2003)*	*27*
Tableau 1-4	*Correspondances entre termes étrangers et termes français (d'après Flageollet, 1989)*	*30*
Tableau 1-5	*Correspondance étrangère du terme lave torrentielle (d'après Bardou, 2002)*	*31*
Tableau 1-6	*Description d'événements de laves torrentielles (in Sauret, 1987)*	*34*
Tableau 1-7	*Classification rhéologique en France des laves torrentielles (d'après Ancey, 1999)*	*35*
Tableau 1-8	*Modèles globaux de prédiction des volumes transportés par les crues des torrents (d'après Machi, 1999, modif.)*	*58*
Tableau 1-9	*Apports sédimentaires de différents types de biefs torrentiels (d'après Hungr et al., 1984, modif.)*	*59*
Tableau 1-10	*Modèles sous forme de régressions permettant de calculer le volume moyen de la lave torentielle (M*), le débit maximum (Q_{max}), la fréquence moyenne (f), et un indice d'activité (I_A) pour différents types de torrents canadiens de Colombie Britannique (d'après Bovis et Jacob, 1999)*	*60*
Tableau 1-11	*Classement chronologique des événements torrentiels (d'après le service de la RTM) et des photographies aériennes disponibles depuis 1950 sur le bassin versant du Manival*	*69*
Tableau 2-1	*Outils topographiques et méthodologie de mesure adaptés pour répondre à un objectif précis*	*82*
Tableau 2-2	*Clichés utilisés pour l'étude diachronique du torrent du Manival*	*96*
Tableau 2-3	*Coordonnées des points mesurés par GPS différentiel sur le terrain (Lambert III, ellipsoïde de Clarke 1880)*	*100*
Tableau 2-4	*Tableau de synthèse des différents calculs intermédiaires pour obtenir le volume des sédiments mobilisables (colonne 10)*	*143*
Tableau 3-1	*Correspondance entre temps de retour et variable de Gumbel*	*182*
Tableau 3-2	*Valeurs de pluies journalières et horaires pour les stations pluviométriques et pluviographiques proches du Manival (d'après Kieffer-Weisse, 1998 et Graff, 2000)*	*183*
Tableau 3-3	*Observations et mesures d'une zone d'environ 1000 m² dans la partie amont du ravin du Manival, en tête de bassin versant*	*186*
Tableau 3-4	*Déductions détaillées ayant permis le calcul des bilans sédimentaires équilibrés (postérieurs à 1992, date de construction de l'ouvrage terminal de la plage de dépôt) pour le chenal du Manival (Cf. Fig. 3-33)*	*203*
Tableau 3-5	*Estimations des volumes sédimentaires et des laves torrentielles à partir des budgets sédimentaires partiels (Bilan Sed.) et des archives de la RTM (Estim. RTM) au torrent du Manival*	*206*
Tableau 3-6	*Estimation des taux d'érosion du bassin du Manival. La plupart des valeurs sont des estimations minimales (>) sauf pour les valeurs d'entrées dans le système après 1992 où les bilans sédimentaires sont équilibrés (=, ou < pour la période 1996-1998) (Veyrat-Charvillon et Mémier, 2005)*	*207*
Tableau 3-7	*Volume potentiel total de sédiments stockés dans le chenal du Manival. Calculs de la méthode de PREVENT ne prenant en compte que la partie supérieure du chenal ayant une pente de plus de 8° (amont du barrage RTM n°47)*	*226*
Tableau 4-1	*Volumes de matériaux extraits des plages de dépôt du torrent du Merdarêt ; source Sommiers de la forêt (service RTM) et Etude d'aménagement (*) de Koulinski (2004)*	*240*
Tableau 4-2	*Volumes de matériaux extraits de la plage de dépôt du torrent des Arches ; source Technicien du service de la RTM et Rapport de révision d'aménagement (*) (R.T.M., 2003)*	*245*
Tableau 4-3	*Volumes potentiels de matériaux accumulés dans le chenal du Merdarêt en 2000 et estimation du volume maximum transportable par une lave torrentielle selon la méthode de PREVENT (en gras)*	*247*
Tableau 4-4	*Volumes potentiels de matériaux accumulés dans le chenal des Arches de 1998 à 2001 et estimation du volume maximum transportable par une lave torrentielle selon la méthode de PREVENT (en gras)*	*251*
Tableau 4-5	*Estimation du volume de l'événement du 24 juillet 2000 sur le torrent du Merdarêt à partir des mesures topographiques (valeurs en m^3)*	*257*
Tableau 4-6	*Estimation du volume sédimentaire du chenal de 1998 à 2001 sur le torrent des Arches à partir des mesures topographiques (valeurs en m^3)*	*259*
Tableau 4-7	*Prix indicatifs pour le traitement par mesures photogrammétriques d'un chenal torrentiel effectué par un cabinet de géomètres-experts*	*263*

ANNEXES

1. Traitement des mesures topographiques pour le calcul du volume des sédiments potentiellement mobilisables du chenal
2. Macro-commandes pour *Excel* (VBA)
3. Manuel du restituteur numérique *Anaglihr Poivillier E.*
4. Classification géologique de Robert Marie
5. Torrent du Manival - Fiche événement du service de la RTM du 30 avril 1968

Traitement des mesures topographiques pour le calcul du volume des sédiments potentiellement mobilisables du chenal

1. Acquisition des données : mesures topographiques

Le traitement des mesures a été automatisé grâce au développement d'outils spécifiques : programmation de macro-commandes et feuilles de calcul (logiciel Excel). L'utilisation de cette chaîne de traitement semi-automatique impose certaines contraintes dans l'ordre d'acquisition des données qui permettent les opérations répétitives de calcul. Ainsi les mesures ont toujours été effectuées dans le même ordre, de la rive droite à la rive gauche, et de l'aval vers l'amont.

Les appareils de mesures topométriques donnent des valeurs d'angles et de distances qu'il faut dans un premier temps convertir en coordonnées topographiques x, y, et z. Ces coordonnées sont des mesures de profil en travers et d'un profil en long du talweg.

1.1. Conversion des données de terrain en coordonnées topographiques

Les données des appareils de mesure, composées d'angles et de distances, sont enregistrées dans un petit ordinateur portatif, Psion Workabout, utilisé comme un carnet de terrain. Les données de chaque mesure, séparées par des virgules, sont stockées en lignes dans un fichier ASCII (extension .txt), qui est ensuite exporté dans un ordinateur de type PC. Pour chaque station et les points de mesure qui lui sont associés, un fichier ASCII est créé.

Deux macro-commandes traitent alors ces informations. La première, *donneesbrutes*, recherche les fichiers du Psion et classe les données sous forme de tableau, automatiquement enregistré dans un fichier nommé *DataTopo.xls*. Pour conserver ce dernier, il est conseillé de le renommer en ajoutant la date et éventuellement le lieu des mesures. Le Psion enregistrant toutes les visées prises par les appareils, il est nécessaire de vérifier le tableau (*DataTopo.xls*) pour éliminer les éventuelles erreurs de manipulations de terrain lors des visées.

La seconde macro-commande, *coordopoint*, permet ensuite de calculer des coordonnées x, y et z des points de mesure, en considérant le premier point comme origine du repère.

1.2. Profils en travers

Les profils en travers sont constitués de quatre points mesurés dans l'ordre suivant :

1-berge de rive droite,

2 (ou 3)-point haut dans la partie centrale du chenal (40% de la largeur),

3 (ou 2)-talweg (point le plus bas du chenal où s'effectue l'écoulement),

4-berge de rive gauche.

Les coordonnées de ces points topographiques sont stockées dans un fichier nommé *Trans4pt…… .xls* (complété par la date et le lieu de mesure), composé d'une feuille de calcul de la forme suivante :

x	y	z	N°de transect	Remarques	
856500.223	3282736.89	1043.783	1	Plage de dépôt	
856497.781	3282756.69	1043.050	1		
856496.433	3282764.55	1044.588	1		
856497.141	3282770.71	1044.703	1		
856437.695	3282758.46	1052.047	2		

1.3. Profil en long du talweg

Trois types de points composent le profil en long :

Les points de talweg des profils en travers (point n°3 du profil en travers),

Les stations (appareillage de mesure) placées à mi-distance entre les profils en travers,

Les points à la base des seuils, sachant que lorsqu'il y a un seuil le sommet de celui-ci est déterminé par une station.

Les coordonnées des points du premier type sont déjà stockées dans le fichier de profils en travers (*Trans4pts…… .xls*). Le fichier comprenant les coordonnées des points des deux autres types est nommé *Intertrans4pts…… .xls* (complété par la date et le lieu de mesure), feuille de calcul de la forme suivante :

x	y	z	N°de transect	Remarques	
856497.781	3282756.69	1043.514	-2	Plage de dépôt	
856441.07	3282774.36	1049.247	-3		
856389.112	3282770.56	1053.39			
856386.887	3282772.01	1056.63	-4	Seuil n°23	
856338.343	3282790.52	1060.752	-5		
856285.415	3282794.71	1068.096	-6		

La numérotation des stations a été indiquée par un signe négatif suivi du numéro de profil en travers qu'elle précède, alors que la base des seuils précédant toujours une station n'a pas de numéro (comme la troisième ligne du tableau).

Pour obtenir le profil en long complet, dans le fichier *PL…… .xls*, nous avons utilisé la macro-commande *FraFichdeBasePLTrans* qui prend les données dans les deux fichiers de base, *Trans4pts…… .xls* et *Intertrans4pts…… .xls*, pour créer un tableau de la forme suivante (fichier *PL…… .xls*) :

x	y	z	N°du transect suivant la station	Remarques	
856521.4	3282755.33	1043.05	1		
856497.781	3282756.69	1043.514	-2	Plage de dépôt	
856465.704	3282766.07	1047.368	2		
856441.07	3282774.36	1049.247	-3		
856415.229	3282781.35	1052.488	3		
856389.112	3282770.56	1053.39			
856386.887	3282772.01	1056.63	-4	Seuil n°23	
856363.646	3282783.63	1057.953	4		
856338.343	3282790.52	1060.752	-5		
856311.611	3282792.08	1064.53	5		
856285.415	3282794.71	1068.096	-6		

2. Calcul de volumes sédimentaires potentiellement mobilisables dans le chenal

Chaque profil en travers représente un bief du torrent assez homogène du fait de la longueur réduite des biefs (inférieure ou égale à 50 mètres). L'aire de la section des matériaux mobilisables, comprise entre la topographie de surface et le Profil en Travers d'Ablation (PTA), est multiplié par la longueur du bief pour obtenir le volume de matériaux potentiellement mobilisable de ce dernier. Le volume total est ensuite obtenu en additionnant le volume de chaque bief, suivant la méthode classique de casiers sédimentaires.

Ce résultat nécessite des calculs intermédiaires : les Profils en Long d'Ablation de Niveau de référence du fond (PLAN sup. et PLAN inf.), la largeur et l'aire de la section des matériaux mobilisables, la longueur de chaque casier.

2.1. Les Profils en Long d'Ablation de Niveau de référence du fond (PLAN sup. et PLAN inf.)

Le PLAN de référence du fond est un élément déterminant puisqu'il permet d'établir le niveau du fond des PTA (Profil en Travers d'Ablation), donnant la dimension verticale indispensable au calcul des volumes. Deux profils de référence ont été retenus : PLAN sup., un profil correspondant à une pente de compensation (profil a), hypothèse minimaliste, et PLAN inf., un profil prenant en compte une pente d'érosion maximum (profil c), hypothèse maximaliste. Les PLAN sont déterminés par les points durs du profil en long, seuils artificiels (barrages « RTM ») ou naturels (seuils rocheux), qui doivent être au préalable répertoriés de la manière la plus exhaustive possible.

Le premier profil de référence (profil a) qui correspond au fichier nommé *PLANsup.xls*, est composé de deux points par seuil : un point correspondant à la base du seuil (aval) et un point correspondant au sommet du même seuil (amont). Les coordonnées de ces points peuvent être prises dans le fichier *Intertrans4pts…… .xls*, et parfois complétées par des données d'archive pour connaître les coordonnées de seuils qui, au moment des mesures topographiques n'étaient pas visibles car enfouis sous des sédiments.

Le second profil de référence (profil c) constitue le fichier *PLANinf.xls*. Il s'apparente au fichier *PLANsup.xls* précédent, avec l'ajout de points « d'inflexion » entre les seuils. Sur la figure ci-dessous où est représenté le profil en long entre deux seuils artificiels, le point d'inflexion est nommé I. En référence à cette figure, les coordonnées du point I sont calculées à l'aide des formules trigonométriques suivantes:

$$x_I = \frac{x_B - \tan\beta.y_B - \tan\beta.\tan\alpha.x_A + \tan\beta.y_A}{1 - \tan\beta.\tan\alpha}$$

$$y_I = \tan\alpha\,(x_I - x_A) + y_A$$

Bien entendu, puisque l'on travaille sur le profil en long, x correspond à la distance (D) dans le profil en long et y à l'altitude (z).

Enfin, la distance dans le profil en long, pour l'ensemble des fichiers *PL.xls*, *PLANsup.xls*, *PLANinf.xls*, est insérée dans une quatrième colonne. Le calcul de la distance (D) est le suivant :

$$D = \sqrt{(x - x_{Origine})^2 + (y - y_{Origine})^2}$$

2.1.1. La largeur et l'aire de la section des matériaux mobilisables

Le principe de calcul de l'aire de la section des matériaux mobilisables, présenté sur la **figure 2-29**, consiste à déterminer une équation en x^2 selon la méthode des moindres carrés à partir des quatre points de mesure topographique, puis calculer l'intégrale entre cette équation et le niveau d'ablation de référence du fond (PLAN sup. et PLAN inf.).

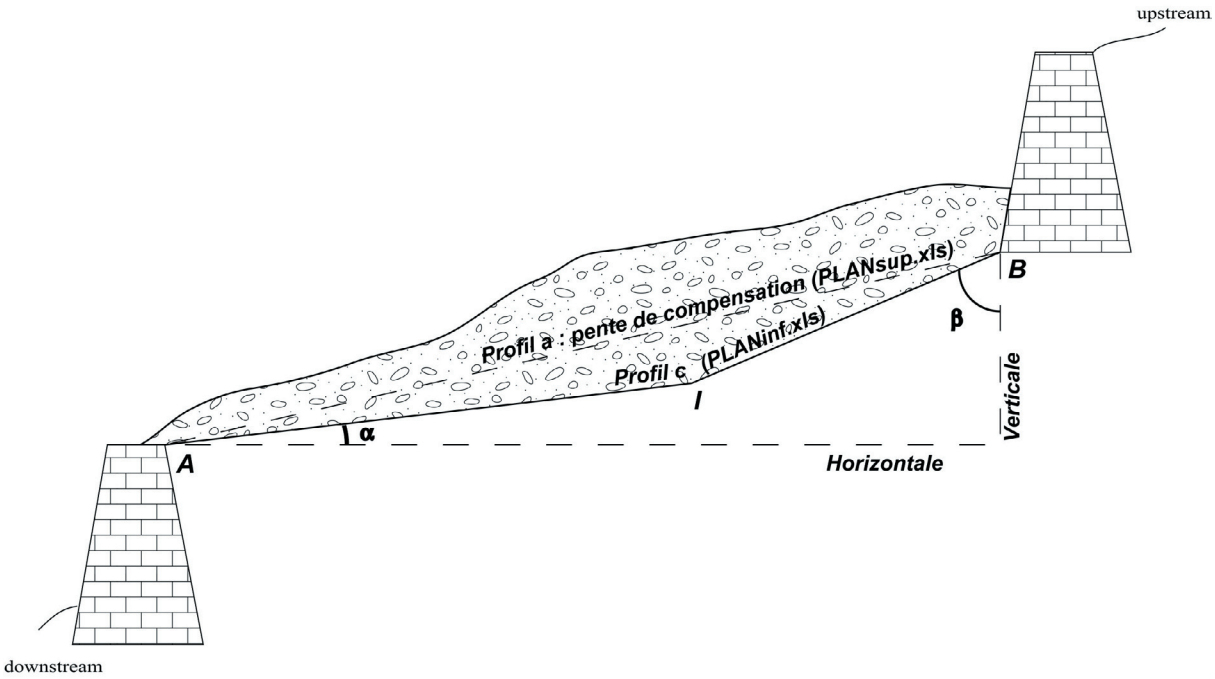


Figure
Profils de références, PLAN sup. (profil a) et PLAN inf. (profil c). Le point d'inflexion, I, permet le calcul du PLAN inf. et la création du fichier PLANinf.xls

Ces calculs ont été effectués à l'aide de la macro-commande nommée *LargeuretAireSection*. Le tableau de départ pour l'utilisation de cette macro-commande est le suivant :

x	y	z	N°de transect	Altitude du profil de référence (zPLR)	
856500.223	3282736.89	1043.783	1	1040.1	
856497.781	3282756.69	1043.514			
856496.433	3282764.55	1044.588			
856497.141	3282770.71	1044.703			
856437.695	3282758.46	1052.047	2	1049.3	

Le résultat est inscrit sur deux colonnes ajoutées au tableau de départ nommées respectivement : Largeur et Aire Section. Le principe de calcul est en premier lieu la recherche, sur le plan horizontal (x, y), d'une droite de tendance la plus proche des quatre points (méthode des moindres carrés), et la projection des points sur cette dernière. Puis, en second lieu, le calcul d'intégrale, sur le plan vertical (z), avec l'aide du *Solveur*, macro-commande complémentaire du logiciel *Excel*.

2.2. La longueur de chaque casier

Les profils en travers sont représentatifs des casiers ou biefs successifs. La longueur de chacun de ces casiers est délimitée par les stations placées de part et d'autre des profils en travers. Pour calculer la longueur (L) de chaque casier, il suffit donc de reprendre les valeurs x et y des stations dans le fichier *Intertrans4pts…… .xls* et de calculer dans une feuille de calcul spécifique (*PrLongueur.xls*) les distances successives qui les séparent. La formule de calcul est la suivante :

$$L = \sqrt{(x - x_{Précédent})^2 + (y - y_{Précédent})^2}$$

2.3. Les volumes potentiels

Pour effectuer le calcul des volumes, un tableau de synthèse de dix colonnes est créé dans un fichier nommé *PLHsup.xls* ou *PLHinf.xls* en fonction du profil de référence utilisé :

1 N° Transect	2 Distance sur PL D	3 Alt. Z du PLAN ZPLAN	4 Alt. Z du PL ZPL	5 Hauteur par rapport au PLAN, dz	
Utilisation du fichier de données topographiques		Utilisation des fichiers de données topographiques et de PLAN		Formule Col.4-Col.3	

	6 Largueur ω	7 Aire de la Section S	8 Hauteur moyenne ou spécifique par m^2 Hmoy	9 Longueur L	10 Volume V
	Utilisation de la macro LargueuretAireSection		Formule $\frac{Col.7}{Col.6}$	Feuille de calcul de L	Formule Col.7 X Col.9
				Volume total :	*Somme Col. 10*

Le volume total est obtenu en faisant la somme des valeurs de la colonne 10. La colonne 8, quant à elle, si elle ne participe pas au calcul des volumes, permet toutefois de comparer l'état de secteurs différents du chenal.

Macro-commandes pour Excel (VBA)

Macro: *donneesbrutes* et *coordopoint*

Par défault, pour chaque station les fichiers du Psion sont sous la forme : S1.txt, «S2.txt», ...

Dans le fichier «MacroTopo.xls»

* faire tourner la macro «donneesbrutes» (racourci Ctrl+a)

Attention aux répertoires de stockage des fichiers

Attention vérifier le résultat (erreurs lors des manips de terrain) créé dans le fichier DataTopo.xls

* faire tourner la macro «coordopoint» (racourci Ctrl+z)

Les coordonnées X,Y,Z se trouvent sur la feuille 2 du fichier «DataTopo.xls»

Le premier point de mesure constitue l'origine (indiquez le n° de station) et les doublons correspondent aux points communs mesurés par deux stations successives

Conseil: Renommer «MacroTopo.xls» pour le conserver

Rq: Une des macros utilise le solveur (SOLVEUR.XLA), s'il n'est pas installé il y a risque de bug

(dans Outils > Macros > Visual Basic Editor > Outils > Références ; soit l'enlever, soit l'installer)

```
Sub donneesbrutes()
'
' donneesbrutes Macro
' Macro enregistrée le 29/05/2000 par VEYRAT
'
'
' déclaration de variables

Dim Message, Title, Default, NBRESTATION, DEBUSTATION 'pour la demande nbre de stations
Dim STATION, HexSTATION, ValNBRESTATION, ValDEBUSTATION ' pour ouverture fichiers txt
Dim MILLIER, CENTAINE, DIZAINE, UNITE As Long
Dim HexMILLIER, HexCENTAINE, HexDIZAINE, HexUNITE As String
Dim CPTEURLIGNE As Integer
CPTEURLIGNE = 2
Dim a(1 To 500, 1 To 6) As Double 'nb à virgule en double précision
Dim L As Integer  'integer: nombre entier   Nbre de ligne pour matrice A
Dim NL, HexCPTEURLIGNE As String 'NL=Hex(L) pour sel les col
Dim VALEUR As Variant 'variant: entier ou décimal etc....


' demande le nom du repertoire
Dim NOMREP
Message = «Entrez le répertoire de travail» ' Définit le message.
Title = «Macro donneesbrutes : fichier .txt Psion --> fichier Excel» ' Définit le titre.
Default = «C:\Mes documents\ManipManival\TopoChenal\»    ' Définition la valeur par défaut.
NOMREP = InputBox(Message, Title, Default) ' Affiche le message, le titre et la valeur par défaut.
If NOMREP = «» Then Exit Sub

' demande le nom du fichier
Dim NOMFICH
Message = "Entrez le nom des fichiers (sans les n°)» ' Définit le message.
Default = «s»    ' Définition la valeur par défaut.
NOMFICH = InputBox(Message, Title, Default) ' Affiche le message, le titre et la valeur par défaut.
If NOMFICH = «» Then Exit Sub

' création d'un dossier Temp (et élimination précédente du dossier s'il est plein)
Dim REP, REP2
REP = Dir(«» + NOMREP + «TempMacro\»)
If REP <> «» Then Kill («» + NOMREP + «TempMacro\*.*»)

REP = Dir(«» + NOMREP + «TempMacro\», 16)
If REP <> «» Then RmDir («» + NOMREP + «TempMacro»)

MkDir «» + NOMREP + «TempMacro»

REP = Dir(«» + NOMREP + «DataTopo.xls»)
If REP = «DataTopo.xls» Then
   Name «» + NOMREP + «DataTopo.xls» As «» + NOMREP + «TempMacro\DataTopo.bak»
   End If

' demande le nombre de stations mesurées et le n° de la station de départ

Message = «Entrez le n° de la dernière station» ' Définit le message.
Default = «1»    ' Définition la valeur par défaut.
NBRESTATION = InputBox(Message, Title, Default) ' Affiche le message, le titre et la valeur par défaut.
If NBRESTATION = «» Then Exit Sub

Message = "Entrez le n° de la station de départ» ' Définit le message.
```

```
Default = «1»   ' Définition la valeur par défaut.
DEBUSTATION = InputBox(Message, Title, Default) ' Affiche le message, le titre et la valeur par défaut.
If DEBUSTATION = «» Then Exit Sub

' Ouverture d'une feuille
Workbooks.Add
' Ecrit les étiquettes sur ligne 1
Range(«A1»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «Station»
Range(«B1»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «HD»
Range(«C1»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «VD»
Range(«D1»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «SD»
Range(«E1»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «Inc»
Range(«F1»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «Az»
Range(«G1»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «N°"
ActiveWorkbook.SaveAs Filename:="" + NOMREP + "DataTopo.xls", FileFormat _
      :=xlNormal, Password:="", WriteResPassword:="", ReadOnlyRecommended:= _
      False, CreateBackup:=False

'Ouverture des fichiers .txt

ValNBRESTATION = Val(NBRESTATION)
ValDEBUSTATION = Val(DEBUSTATION)
If ValDEBUSTATION > ValNBRESTATION Then ValDEBUSTATION = ValNBRESTATION
For STATION = ValDEBUSTATION To ValNBRESTATION

      'Pour nbre > 10 et < 1000
      CENTAINE = STATION \ 100
      DIZAINE = (STATION - CENTAINE * 100) \ 10
      UNITE = STATION - (CENTAINE * 100) - (DIZAINE * 10)
      If CENTAINE = 0 Then HexCENTAINE = «» Else HexCENTAINE = Hex(CENTAINE)
      If DIZAINE = 0 Then
         If CENTAINE = 0 Then HexDIZAINE = «» Else HexDIZAINE = «0»
         End If
      If DIZAINE <> 0 Then HexDIZAINE = Hex(DIZAINE)
      HexUNITE = Hex(UNITE)

      HexSTATION = HexCENTAINE + HexDIZAINE + HexUNITE
   Workbooks.OpenText Filename:=»» + NOMREP + NOMFICH + HexSTATION + «.txt», Origin:= _
   xlWindows, StartRow:=1, DataType:=xlDelimited, TextQualifier:= _
   xlDoubleQuote, ConsecutiveDelimiter:=False, Tab:=False, Semicolon:=False _
   , Comma:=True, Space:=False, Other:=False, FieldInfo:=Array(Array(1, 1), _
   Array(2, 1), Array(3, 1), Array(4, 1), Array(5, 1), Array(6, 1), Array(7, 1), Array(8, 1), _
   Array(9, 1), Array(10, 1))

   ' détermine le nombre de lignes de la feuille 1 (colonne1)
   Worksheets(«» + NOMFICH + HexSTATION + «»).Activate
   L = 1
   VALEUR = Cells(L, 1).Value
   While VALEUR <> Empty
   L = L + 1
   VALEUR = Cells(L, 1).Value
   Wend
   L = L - 1

   , supprime les col inutiles

      ,Pour nbre > 10 et < 10000
      MILLIER = L \ 1000
      CENTAINE = (L - MILLIER * 1000) \ 100
      DIZAINE = (L - MILLIER * 1000 - CENTAINE * 100) \ 10
      UNITE = L - MILLIER * 1000 - CENTAINE * 100 - DIZAINE * 10
      If MILLIER = 0 Then HexMILLIER = «» Else HexMILLIER = Hex(MILLIER)
      If CENTAINE = 0 Then
         If MILLIER = 0 Then HexCENTAINE = «» Else HexCENTAINE = «0»
         End If
         If CENTAINE <> 0 Then HexCENTAINE = Hex(CENTAINE)
      If DIZAINE = 0 Then
         If CENTAINE = 0 Then HexDIZAINE = «» Else HexDIZAINE = «0»
         End If
         If DIZAINE <> 0 Then HexDIZAINE = Hex(DIZAINE)
      HexUNITE = Hex(UNITE)

      NL = HexMILLIER + HexCENTAINE + HexDIZAINE + HexUNITE

   Range(«A1:A» + NL + «,B1:B» + NL + «,D1:D» + NL + «,F1:F» + NL + «,H1:H» + NL + «,J1:J» + NL + «»).Select
   Selection.Delete Shift:=xlToLeft

   ' remet les col à la bonne place
   Range(«B1:B» + NL + «»).Select
   Selection.Cut
```

```
    Range(«F1»).Select
    ActiveSheet.Paste

    Range(«C1:C» + NL + «»).Select
    Selection.Cut
    Range(«E1»).Select
    ActiveSheet.Paste

    Range(«A1:A» + NL + «»).Select
    Selection.Cut
    Range(«B1»).Select
    ActiveSheet.Paste

    ‘Copier coller dans feuille “DataTopo.xls”

        ‘Pour nbre > 10 et < 10000
        MILLIER = CPTEURLIGNE \ 1000
        CENTAINE = (CPTEURLIGNE - MILLIER * 1000) \ 100
        DIZAINE = (CPTEURLIGNE - MILLIER * 1000 - CENTAINE * 100) \ 10
        UNITE = CPTEURLIGNE - MILLIER * 1000 - CENTAINE * 100 - DIZAINE * 10
        If MILLIER = 0 Then HexMILLIER = «» Else HexMILLIER = Hex(MILLIER)
        If CENTAINE = 0 Then
            If MILLIER = 0 Then HexCENTAINE = «» Else HexCENTAINE = «0»
            End If
            If CENTAINE <> 0 Then HexCENTAINE = Hex(CENTAINE)
        If DIZAINE = 0 Then
            If CENTAINE = 0 Then HexDIZAINE = «» Else HexDIZAINE = «0»
            End If
            If DIZAINE <> 0 Then HexDIZAINE = Hex(DIZAINE)
        HexUNITE = Hex(UNITE)

        HexCPTEURLIGNE = HexMILLIER + HexCENTAINE + HexDIZAINE + HexUNITE

    Range(«A1:F» + NL + «»).Select
    Selection.Copy
    Windows(«DataTopo.xls»).Activate
    Range(«A» + HexCPTEURLIGNE + «»).Select
    ActiveSheet.Paste

        ‘ Fermer fichier txt
        Windows(«» + NOMFICH + HexSTATION + «.txt»).Activate
        ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=»» + NOMREP + «TempMacro\» + NOMFICH + HexSTATION + «.xls», FileFormat _
        :=xlNormal, Password:=»», WriteResPassword:=»», ReadOnlyRecommended:= _
        False, CreateBackup:=False
        ActiveWorkbook.Close

    ‘ ecrit le n° de la station ds col 1
    Range(«A» + HexCPTEURLIGNE + «»).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = HexSTATION

    CPTEURLIGNE = CPTEURLIGNE + L

        ‘Pour nbre > 10 et < 10000
        MILLIER = CPTEURLIGNE \ 1000
        CENTAINE = (CPTEURLIGNE - MILLIER * 1000) \ 100
        DIZAINE = (CPTEURLIGNE - MILLIER * 1000 - CENTAINE * 100) \ 10
        UNITE = CPTEURLIGNE - MILLIER * 1000 - CENTAINE * 100 - DIZAINE * 10
        If MILLIER = 0 Then HexMILLIER = «» Else HexMILLIER = Hex(MILLIER)
        If CENTAINE = 0 Then
            If MILLIER = 0 Then HexCENTAINE = «» Else HexCENTAINE = «0»
            End If
            If CENTAINE <> 0 Then HexCENTAINE = Hex(CENTAINE)
        If DIZAINE = 0 Then
            If CENTAINE = 0 Then HexDIZAINE = «» Else HexDIZAINE = «0»
            End If
            If DIZAINE <> 0 Then HexDIZAINE = Hex(DIZAINE)
        HexUNITE = Hex(UNITE)

        HexCPTEURLIGNE = HexMILLIER + HexCENTAINE + HexDIZAINE + HexUNITE

Next

‘ écrire VD
Range(«C2»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «=RC[1]*SIN(RADIANS(RC[2]))»
Selection.AutoFill Destination:=Range(«C2:C» + HexCPTEURLIGNE + «»), Type:=xlFillDefault

‘ et N°
Range(«G2»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «1»
Range(«G3»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «2»
Range(«G2:G3»).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(«G2:G» + HexCPTEURLIGNE + «»), Type:=xlFillDefault

‘ supp. dernier rang (CPTEURLIGNE-1)
Rows(“” + HexCPTEURLIGNE + “:” + HexCPTEURLIGNE + “”).Select
```

```
Selection.Delete Shift:=xlUp

End Sub
```

```
Sub coordopoint()
‘
‘ coordopoint Macro
‘ Macro enregistrée le 27/05/2000 par VEYRAT
‘
‘
‘ déclaration de variables

Dim DEBUSTATION, Message, Title, Default
Dim ValDEBUSTATION
Dim XPT, YPT, ZPT, HDPT, VDPT, AZPT As Double
Dim a(1 To 5000, 1 To 6) As Double ‘nb à virgule en double précision
Dim n As Integer  ‘integer: nombre entier
Dim i As Integer
Dim V As Variant ‘variant: entier ou décimal etc....

‘ Demande n°station du pt d’origine

Message = «Entrez le n° de la station du point d’origine» ‘ Définit le message.
Title = «Macro coordopoint : calcul X, Y, Z dans Feuil2» ‘ Définit le titre.
Default = «1»    ‘ Définition la valeur par défaut.
DEBUSTATION = InputBox(Message, Title, Default) ‘ Affiche le message, le titre et la valeur par défaut.
If DEBUSTATION = «» Then Exit Sub
ValDEBUSTATION = Val(DEBUSTATION)

‘ détermine le nombre de lignes de la feuille en cours (colonne2)
i = 1
V = Cells(i, 2).Value
While V <> Empty
 i = i + 1
 V = Cells(i, 2).Value
Wend
n = i - 1

‘ boucle pour lire les données de la feuille 1 et les mettre
‘ dans le tableau «A»
For i = 2 To n
    For j = 1 To 6
      a(i, j) = Cells(i, j).Value
    Next
Next

Worksheets(«feuil2»).Activate
XPT = 0
YPT = 0
ZPT = 0
HDPT = a(2, 2)
VDPT = a(2, 3)
AZPT = a(2, 6)

‘ écrire sur la première ligne X,Y, Z
    Range(«A1»).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = «X»
    Range(«B1»).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = «Y»
    Range(«C1»).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = «Z»
    Range(«A2»).Select
‘calcul de X , Y, Z
For i = 2 To n

        If a(i, 1) > ValDEBUSTATION Then
          XPT = Cells(i - 1, 1).Value
          YPT = Cells(i - 1, 2).Value
          ZPT = Cells(i - 1, 3).Value
          HDPT = a(i, 2)
          VDPT = a(i, 3)
          AZPT = a(i, 6)
        End If

        Cells(i, 1).Value = a(i, 2) * Sin((a(i, 6)) * 3.14159 / 180) + XPT - HDPT * Sin((AZPT) * 3.14159 / 180)
        Cells(i, 2).Value = a(i, 2) * Cos(a(i, 6) * 3.14159 / 180) + YPT - HDPT * Cos((AZPT) * 3.14159 / 180)
        Cells(i, 3).Value = a(i, 3) + ZPT - VDPT

Next

End Sub
```

```
Sub FraFichdeBasePLTrans()
‘
‘ FraElimDoublon Macro
‘ Macro enregistrée le 18/06/2001 par VEYRAT
‘ Touche de raccourci du clavier: Ctrl+l
```

```
‘
‘ Variables
Dim i
Dim STATION
i = 3
STATION = 1
Dim n
Dim AJOUTLIGN
Dim a(1 To 5000, 1 To 3) As Double ‘pts bas des transects
Dim j, k, z
Dim Doubl

‘Prépare col D pour ajouter les stations
Worksheets(«feuil2»).Activate
   Range(«D1»).Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 = “Station”
   Range(“D2”).Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 = 1

‘Suppr les doublons et numérote les stations (col D)
‘pr créer feuil transects (feuil2)
Range(«A3»).Select
While Cells(i, 1).Value <> «»
   j = (Cells(i, 1).Value * 100000 \ 1) / 100000
   k = (Cells((i - 1), 1).Value * 100000 \ 1) / 100000
   ‘Doubl = (Cells(i, 1).Value = Cells((i - 1), 1).Value) ‘And (Cells(i, 2).Value = Cells((i - 1), 2).Value) And (Cells(i, 3).Value = Cells((i - 1), 3).Value)
   If j = k Then
      Range(Cells(i, 1), Cells(i, 5)).Select
      Selection.Delete Shift:=xlUp
      STATION = STATION + 1
      Cells(i, 4).Value = STATION
      i = i - 1
      End If
   i = i + 1
Wend

‘Extrait les points de bas de barrage (hors transects)
‘et les placent ds feuil stations (feuil3)
   j = 1
   AJOUTLIGN = 0
For n = 3 To (i - 1)
   If Cells(n, 4).Value = «» Then j = j + 1 Else j = 1
   If j = 5 Then ‘Si plus de 4 valeurs ds un transect (5 valeurs)...
      Range(Cells(n - 1, 1), Cells(n - 1, 5)).Select
      Selection.Cut          ‘... récupération de la 4me val sur 5
      Sheets(«Feuil3»).Select ‘et insertion ds feuil 3 avec stations
      Range(Cells(((n - 1) \ 4) + 2 + AJOUTLIGN, 1), Cells(((n - 1) \ 4) + 2 + AJOUTLIGN, 5)).Select
      Selection.Insert Shift:=xlDown
      Sheets(«Feuil2»).Select
      Selection.Delete Shift:=xlUp
      AJOUTLIGN = AJOUTLIGN + 1
      n = n - 1
      End If
Next

‘Création de la feuil profil en long (feuil1)
k = 1
For n = 2 To (i - 1) Step 4
   If Cells(n, 3).Value < Cells(n + 1, 3).Value Then
      j = 0
      z = Cells(n, 3).Value
      Else: j = 1
         z = Cells(n + 1, 3).Value
      End If
   If Cells(n + 2, 3).Value < z Then
      j = 2
      z = Cells(n + 2, 3).Value
      End If
   If Cells(n + 3, 3).Value < z Then
      j = 3
      End If

   a(k, 1) = Cells(n + j, 1).Value
   a(k, 2) = Cells(n + j, 2).Value
   a(k, 3) = Cells(n + j, 3).Value
   k = k + 1
   Next

   ‘copie la Feuil3 dans Feuil1
Sheets(«Feuil1»).Select
Cells.Select
Selection.ClearContents
Sheets(«Feuil3»).Select
Cells.Select
Selection.Copy
Sheets(«Feuil1»).Select
Range(«A1»).Select
```

```
ActiveSheet.Paste
Range(«A1»).Select

    'insert les ligne du tableau a (pts bas trans) ds Feuil1 (stations)
j = 1
For n = 1 To i
    If Cells(n, 4).Value = j Then
        Range(Cells(n + 1, 1), Cells(n + 1, 5)).Select
        Selection.Insert Shift:=xlDown
        Cells(n + 1, 1).Value = a(j, 1)
        Cells(n + 1, 2).Value = a(j, 2)
        Cells(n + 1, 3).Value = a(j, 3)
        Cells(n + 1, 4).Value = -(j + 1)
        j = j + 1
        n = n + 1
        End If
    Next

'Renommer feuilles
Sheets("Feuil1").Name = "PL"
Sheets("Feuil2").Name = "Trans4pts"
Sheets("Feuil3").Name = "Stations"
'Sauvegarde avec possibilité de changer le nom fichier
Do
    fName = Application.GetSaveAsFilename
Loop Until fName <> False
ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=fName

End Sub
```

```
Sub LargeuretAireSection()
'
' LargeuretAireSection Macro
' Macro enregistrée le 16/02/01 par Stéphane VEYRAT
'
Dim i, j

' détermine le nombre de lignes de la feuille 1 (colonne1)
Dim VALEUR, n

i = 1
VALEUR = Cells(i, 1).Value
While VALEUR <> «»
 i = i + 1
 VALEUR = Cells(i, 1).Value
Wend
n = i - 1

' boucle pour lire les données de la feuille 1 et les mettre
' dans le tableau «TABLEAU»

Dim TABLEAU(1 To 1000, 1 To 10)
For i = 2 To n
    For j = 1 To 5
      TABLEAU(i, j) = Cells(i, j).Value
    Next
Next

' Résoud équations y=ax+b (moindre carré) en plan (sur x;y)

    Workbooks.Add
    ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=»Temp.xls»

' Boucle pour traiter les valeurs 4 à 4

For i = 2 To n Step 4
    ' Ecrit les équations et les sommes sur une feuille «temp.xls»

    Cells(1, 1) = TABLEAU(i, 1)
    Cells(2, 1) = TABLEAU(i + 1, 1)
    Cells(3, 1) = TABLEAU(i + 2, 1)
    Cells(4, 1) = TABLEAU(i + 3, 1)
    Cells(1, 2) = TABLEAU(i, 2)
    Cells(2, 2) = TABLEAU(i + 1, 2)
    Cells(3, 2) = TABLEAU(i + 2, 2)
    Cells(4, 2) = TABLEAU(i + 3, 2)

    'If i = 2 Then
    '    Cells(1, 4).Select
    '    ActiveCell.FormulaR1C1 = «=(RC[-2]-(R1C3*RC[-3]+R2C3))^2»
    '    Selection.Copy
    '    Range(«D2:D4»).Select
    '    ActiveSheet.Paste
    '
    '    Cells(4, 3).Select
    '    ActiveCell.FormulaR1C1 = «=SUM(R[-3]C[1]:RC[1])»
```

```
    '    End If

    Cells(1, 3).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = «=SLOPE(RC[-1]:R[3]C[-1],RC[-2]:R[3]C[-2])»
    Cells(2, 3).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
       "=INTERCEPT(R[-1]C[-1]:R[2]C[-1],R[-1]C[-2]:R[2]C[-2])"

    '' utilise solveur pour résoudre
    'SolverOk SetCell:=»$C$4», MaxMinVal:=2, ValueOf:=»0», ByChange:=»$C$1:$C$2»
    'SolverSolve userFinish:=True    ' y=ax+b
    'SolverFinish keepFinal:=1

    ' Val a et b --> TABLEAU
    TABLEAU(i, 8) = Cells(1, 3)
    TABLEAU(i + 1, 8) = Cells(2, 3)

' Calcul nelles coordonées sur y=ax+b

    ' Boucle sur chaque point pour le calcul des nelles coordonnées

    Dim X, Y, bb, XX, YY, ZZ
    Dim a, b

    For j = 1 To 4
       ' Lecture de x et y
       X = TABLEAU(i + j - 1, 1)
       Y = TABLEAU(i + j - 1, 2)

       ' Calcul de bb, XX et YY (utilisation éq. de la droite perpendiculaire y=1/a.x+bb)

       a = TABLEAU(i, 8)
       b = TABLEAU(i + 1, 8)

       bb = Y + (1 / a) * X
       XX = (bb - b) / (a + (1 / a))
       YY = a * XX + b

       ' Mise des nelles coordonnées dans matrice à la place des autres
       TABLEAU(i + j - 1, 1) = XX
       TABLEAU(i + j - 1, 2) = YY

       Next j

' Boucle sur chaque point pour le calcul de la distance
' avec le 1er point
'
    Dim D
    Dim XA, YA, XPT, YPT

'lire ds matrice XA et YA

    XA = TABLEAU(i, 1)
    YA = TABLEAU(i, 2)

    For j = 1 To 4
       'lire ds matrice XPT et YPT
       XPT = TABLEAU(i + j - 1, 1)
       YPT = TABLEAU(i + j - 1, 2)

       'calcul de la distance entre pt et 1er pt
       D = ((XPT - XA) ^ 2 + (YPT - YA) ^ 2) ^ 0.5

       ' Mise des distances dans matrice
       TABLEAU(i + j - 1, 6) = D

       Next j
    Next i

' Résoud équations y=ax²+bx+c (moindre carré) en coupe (sur D;z)

' Boucle pour traiter les valeurs 4 à 4
For i = 2 To n Step 4
    ' Ecrit les équations et les sommes sur une feuille «temp.xls»

    Cells(1, 1) = TABLEAU(i, 6)
    Cells(2, 1) = TABLEAU(i + 1, 6)
    Cells(3, 1) = TABLEAU(i + 2, 6)
    Cells(4, 1) = TABLEAU(i + 3, 6)
    Cells(1, 2) = TABLEAU(i, 3) - TABLEAU(i, 5)
    Cells(2, 2) = TABLEAU(i + 1, 3) - TABLEAU(i, 5)
    Cells(3, 2) = TABLEAU(i + 2, 3) - TABLEAU(i, 5)
    Cells(4, 2) = TABLEAU(i + 3, 3) - TABLEAU(i, 5)

    If i = 2 Then
       Cells(1, 4).Select
       ActiveCell.FormulaR1C1 = «=(RC[-2]-(R1C3*RC[-3]^2+R2C3*RC[-3]+R3C3))^2»
```

```
        Selection.Copy
        Range(«D2:D4»).Select
        ActiveSheet.Paste

        Cells(4, 3).Select
        ActiveCell.FormulaR1C1 = «=SUM(R[-3]C[1]:RC[1])»
       End If

    ‘ utilise solveur pour résoudre
    SolverOk SetCell:=»$C$4», MaxMinVal:=2, ValueOf:=»0», ByChange:=»$C$1:$C$3»
    SolverSolve userFinish:=True    ‘ y=ax²+bx+c (avec x=D et y=z)
    SolverFinish keepFinal:=1

    ‘ Val a et b --> TABLEAU
    TABLEAU(i, 9) = Cells(1, 3)
    TABLEAU(i + 1, 9) = Cells(2, 3)
    TABLEAU(i + 2, 9) = Cells(3, 3)

‘ Calcul de la surface du transect (intégrale de la fction)

‘ altitude du niveau de base de référence et z relatif

    Dim c
    ‘ valeurs a, b et c de l’équation (y = ax²+bx+c)

    a = TABLEAU(i, 9)
    b = TABLEAU(i + 1, 9)
    c = TABLEAU(i + 2, 9)

    ‘ Calcul de la surface (section du transect, S)

    Dim w
    w = TABLEAU(i + 3, 6)

    Dim S
    S = a * (w ^ 3 / 3) + b * (w ^ 2 / 2) + c * w  ‘ intégrale

    TABLEAU(i, 7) = S
    Next

‘ fermer “temp.xls”
Workbooks(«temp.XLS»).Close SaveChanges:=False
Kill «temp.XLS»

‘Afficher la matrice col. 6 et 7 (Largeur et Aire section)
‘
Range(«F1»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = “Largeur”
Range(“G1”).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = “Aire de la Section”

For i = 2 To n Step 4
    Cells(i, 6) = TABLEAU(i + 3, 6)
    Cells(i, 7) = TABLEAU(i, 7)
    Next

End Sub
```

Macro: ProjAnamoph

* Sur Excel ouvrir document avec sur 'Feuil1' les points stations (X,Y,Z sur 3 col. avec entête)
  Il s'agit de segments dans le chenal qui permettent de faire la projection perpendiculairement à ces segments
  En amont (seulement en amont) du dernier segment, la projection se fait à l'aide de la dernière station (seulement le point et pas de segments)
* Sur 'Feuil2' placer les points à projeter (X,Y,Z sur 3 col. avec entête) et le n° de la station aval sur col. 5 correspondant au segment permettant la proj. Perpendiculaire
* Lancer la macro ProjAnamorph
  La macro place les coordonnées X et Y projetées sur les col. 6 et 7 de la 'Feuil2'

Feuil1

x	y	z	D

Feuil2

x	y	z	D	N°Station	x proj	y proj

```
Sub ProjAnamorph()
'
' ProjAnamorph Macro
' Macro enregistrée le 08/08/2001 par VEYRAT
'
' Définition de variables
Dim STATION             ' cpteur des n° de station
Dim PTSFIN, STAFIN    ' Nbre de lignes ds feuilles stations et transects
Dim PTS()               ' Tableaux pour mettre les feuilles stations
Dim STA()             ' et transects
Dim XSTA1, YSTA1, ZSTA1, XSTA2, YSTA2, ZSTA2, XPT, YPT, ZPT ' Coordo des pts de station et de mesure
Dim NOSTA               ' N° de la station aval
Dim XPROJ, YPROJ, ZPROJ ' Coordo du pt projeté sur la droite entre les stations
Dim SD                  ' Distance réelle (non projetée, en fction de la pente)
Dim a, b, bb            ' Coef. des équations de droites
Dim i, j              ' Var. pour les boucles
Dim D1, D2              ' Distance sur droite de projection
Dim COEF                ' coef. pr RD ou RG

' LIRE LES 2 FEUIL ET LES METTRE EN MATRICE
' Définit le nombre de ligne de la feuille 1 nommée «Feuil1»

Dim VALEUR

Sheets(«Feuil1»).Select

i = 1
VALEUR = Cells(i, 1).Value
While VALEUR <> «»
 i = i + 1
 VALEUR = Cells(i, 1).Value
Wend
STAFIN = i - 1

' Boucle pour lire les données de la feuille et les mettre
' dans le tableau «STA»

ReDim STA(1 To STAFIN, 1 To 4)

For i = 2 To STAFIN
   For j = 1 To 4
     STA(i, j) = Cells(i, j).Value
   Next
Next

' Définit le nombre de ligne de la feuille 2 nommée «Feuil2»

Sheets(«Feuil2»).Select
i = 1
VALEUR = Cells(i, 1).Value
While VALEUR <> «»
 i = i + 1
 VALEUR = Cells(i, 1).Value
Wend
```

```
PTSFIN = i - 1

‘ Boucle pour lire les données de la feuille et les mettre
‘ dans le tableau «PTS»

ReDim PTS(1 To PTSFIN, 1 To 7)
For i = 2 To PTSFIN
   For j = 1 To 5
     PTS(i, j) = Cells(i, j).Value
   Next
Next

‘ Ajoute 2 col. pr X et Y anamorph.
Range(«E1»).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = «N° station aval”
Range(“F1”).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = “X anamorph.”
Range(“G1”).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = “Y anamorph.”

‘BOUCLE SUR LES DONNEES DES STATIONS
‘Lire les coordo des pts de stations

For i = 2 To PTSFIN
   NOSTA = PTS(i, 5)
      XSTA1 = STA(NOSTA + 1, 1)
      YSTA1 = STA(NOSTA + 1, 2)
      ZSTA1 = STA(NOSTA + 1, 3)
      XSTA2 = STA(NOSTA + 2, 1)
      YSTA2 = STA(NOSTA + 2, 2)
      ZSTA2 = STA(NOSTA + 2, 3)

‘Lire coordo du pt
   XPT = PTS(i, 1)
   YPT = PTS(i, 2)
   ZPT = PTS(i, 3)

‘ Calcul des coordonnées du point projeté sur la droite entre les stations
‘ avec y = ax + b, équation de la droite stations et
‘ y = -1/a . x + bb, équation de la droite de projection perpendiculaire

   a = (YSTA2 - YSTA1) / (XSTA2 - XSTA1)
   b = -a * XSTA1 + YSTA1
   bb = YPT - (-1 / a) * XPT

   ‘XPROJ
   XPROJ = (bb - b) / (a - (-1 / a))
   ‘YPROJ
   YPROJ = a * ((bb - b) / (a - (-1 / a))) + b
   ‘ZPROJ
   ZPROJ = ((((XPROJ - XSTA1) ^ 2 + (YPROJ - YSTA1) ^ 2) ^ 0.5 * (ZSTA2 - ZSTA1)) / ((XSTA2 - XSTA1) ^ 2 + (YSTA2 - YSTA1) ^ 2) ^ 0.5) + ZSTA1

‘ Cas particulier pour les points au niveau (ou <) du chenal
   If ZPROJ > ZPT Then
      PTS(i, 6) = PTS(i, 1)
      PTS(i, 7) = PTS(i, 2)
      Else

‘ Cas des points amont au delà du chenal (projection par rapport à 1 seul point de station)
   D1 = (((XSTA2 - XSTA1) ^ 2) + (YSTA2 - YSTA1) ^ 2) ^ 0.5
   D2 = (((XPROJ - XSTA1) ^ 2) + (YPROJ - YSTA1) ^ 2) ^ 0.5
   If D2 > D1 Then
      a = -1 / ((YPT - YSTA2) / (XPT - XSTA2)) ‘a=-1/a et pour droite entre station2 et Point
      XPROJ = XSTA2
      YPROJ = YSTA2
      ZPROJ = ZSTA2
      End If

   ‘Calcul de la distance réelle SD

      SD = ((XPT - XPROJ) ^ 2 + (YPT - YPROJ) ^ 2 + (ZPT - ZPROJ) ^ 2) ^ 0.5

   ‘Calcul des nouvelles coordonnées pour carte anamorphosée

      If XPT < XPROJ Then COEF = -1 Else COEF = 1
      PTS(i, 6) = COEF * (SD / (1 + (-1 / a) ^ 2) ^ 0.5) + XPROJ
      PTS(i, 7) = COEF * ((-1 / a) * (SD / (1 + (-1 / a) ^ 2) ^ 0.5)) + YPROJ ‘+ bb
      End If
   Next

‘Ecrire résultats dans les 2 col. suplémentaires

For i = 2 To PTSFIN
   Cells(i, 6).Value = PTS(i, 6)
   Cells(i, 7).Value = PTS(i, 7)
   Next
```

End Sub

Macro: MatricesXYZ et InterpolLinInterTrans

MatricesXYZ

* Sur Excel ouvrir le fichier de données de points (X,Y,Z sur 3 col.)

* Lancer la macro *MatricesXYZ*

La macro crée un nouveau fichier avec trois matrices sur 3 feuilles différentes (X, Y, et Z)

InterpolLinInterTrans

* Sur Excel ouvrir le fichier créé par la macro *MatricesXYZ* ci-dessus

* Lancer la macro *InterpolLinInterTrans*

Les transects ont tous le même nombre de point et la macro ajoute des points intermédiaires de façon linéaire et tous les mètres entre les valeurs de même rang des transects

Le résultat est affiché dans un nouveau fichier sur 3 col. (X, Y, et Z)

Rq: Par défault, les transects ont tous 10 points
Important: ils doivent être numérotés dans le même ordre (gauche à droite)

Attention: .aux dimensions des tableaux (au début de la macro '*dim*')
.au dernier transect (vérifier les valeurs --> faire *copier-coller*)

```
Sub MatricesXYZ()
'
' MatricesXYZ Macro
' Macro enregistrée le 24/07/2000 par Etna

' déclaration de variables

Dim n
Dim a()
Dim i As Integer
Dim V As Variant 'variant: entier ou décimal etc....
Dim L
Dim Message, Title, Default
Dim NBRE
Dim ValNBRE

, demande le nombre de point par transect
Message = „Entrez le nombre de point par transect“ , Définit le message.
Title = «Macro MatricesXYZ : crée des tableaux diférents pour X, Y et Z» ' Définit le titre.
Default = «10»   ' Définition la valeur par défaut.
NBRE = InputBox(Message, Title, Default) ' Affiche le message, le titre et la valeur par défaut.
If NBRE = «» Then Exit Sub
ValNBRE = Val(NBRE)

' détermine le nombre de lignes de la feuille 1 (colonne1)
i = 1
V = Cells(i, 1).Value
While V <> «»
 i = i + 1
 V = Cells(i, 1).Value
Wend
n = i - 1

'Dim le tableau A en fction du nbre de ligne
ReDim a(1 To n + ValNBRE, 1 To 3)

' boucle pour lire les données de la feuille 1 et les mettre
' dans le tableau «A»
For i = 2 To n
   For j = 1 To 3
     a(i, j) = Cells(i, j).Value
   Next
Next

' ecrit matrice "X" dans feuille 1 nouvelle page
Workbooks.Add
Sheets(«Feuil1»).Select
Sheets(«Feuil1»).Name = «X»

L = 0
For i = 2 To n Step ValNBRE
   L = L + 1
   For j = 1 To ValNBRE
```

```
    Cells(L, j) = a(i + j - 1, 1)
    Next
Next

‘ ecrit matrice “Y” dans feuille 2 nouvelle page
Sheets(«Feuil2»).Select
Sheets(«Feuil2»).Name = «Y»

L = 0
For i = 2 To n Step ValNBRE
    L = L + 1
    For j = 1 To ValNBRE
    Cells(L, j) = a(i + j - 1, 2)
    Next
Next

‘ ecrit matrice “Z” dans feuille 3 nouvelle page
Sheets(«Feuil3»).Select
Sheets(«Feuil3»).Name = «Z»

L = 0
For i = 2 To n Step ValNBRE
    L = L + 1
    For j = 1 To ValNBRE
    Cells(L, j) = a(i + j - 1, 3)
    Next
Next

End Sub
```

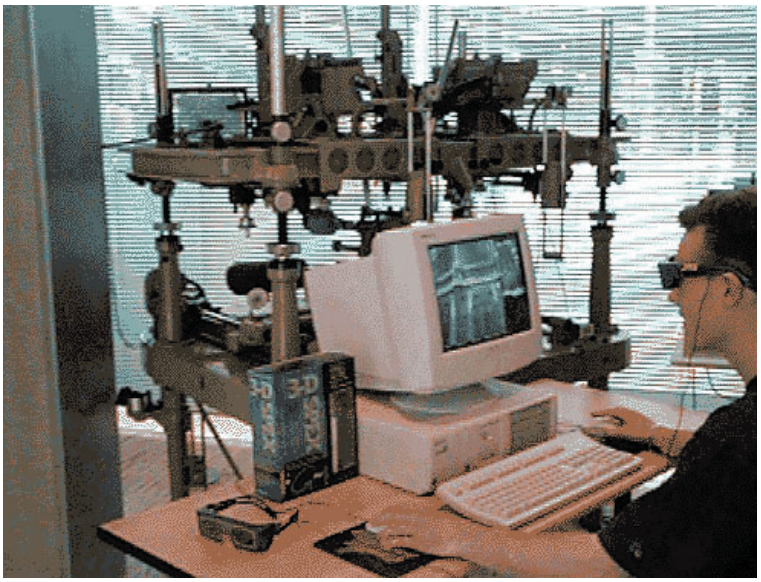
```
Sub InterpolLinInterTrans()
‘
‘ InterpolLinInterTrans Macro
‘ Macro enregistrée le 26/07/2000 par Etna

‘ Déclaration de variables

Dim i, j, n, k
Dim Message, Title, Default
Dim X()
Dim Y()
Dim Z()
Dim MatriceX()
Dim MatriceY()
Dim MatriceZ()
Dim VALEUR
Dim X1, Y1, Z1, X2, Y2, Z2
Dim L
Dim UPPER, UPP
Dim NBRE
Dim ValNBRE

‘ demande le nombre de point par transect
Message = “Entrez le nombre de point par transect” ‘ Définit le message.
Title = «Macro MatricesXYZ : crée des tableaux diférents pour X, Y et Z» ‘ Définit le titre.
Default = «10»   ‘ Définition la valeur par défaut.
NBRE = InputBox(Message, Title, Default) ‘ Affiche le message, le titre et la valeur par défaut.
If NBRE = «» Then Exit Sub
ValNBRE = Val(NBRE)

‘ Feuille de valeur --> matrice “X”
‘ détermine le nombre de lignes de la feuille 1 (colonne1)
Sheets(«X»).Select
i = 1
VALEUR = Cells(i, 1).Value
While VALEUR <> «»
 i = i + 1
 VALEUR = Cells(i, 1).Value
Wend
n = i - 1

‘Dim le tableau A en fction du nbre de ligne
ReDim X(1 To n, 1 To ValNBRE)
ReDim Y(1 To n, 1 To ValNBRE)
ReDim Z(1 To n, 1 To ValNBRE)
ReDim MatriceX(1 To n * 50, 1 To ValNBRE)
ReDim MatriceY(1 To n * 50, 1 To ValNBRE)
ReDim MatriceZ(1 To n * 50, 1 To ValNBRE) As Variant
    ‘**ATTENTION: taille des matrices (50 fois plus que X, Y et Z)**

‘ boucle pour lire les données de la feuille 1 et les mettre
‘ dans le tableau «X»
For i = 1 To n
    For j = 1 To ValNBRE
      X(i, j) = Cells(i, j).Value
    Next
Next
```

```
‘ Feuille de valeur --> matrice “Y”
Sheets(“Y”).Select

‘ boucle pour lire les données de la feuille 1 et les mettre
‘ dans le tableau «Y»
For i = 1 To n
   For j = 1 To ValNBRE
     Y(i, j) = Cells(i, j).Value
   Next
Next

‘ Feuille de valeur --> matrice “Z”
Sheets(“Z”).Select

‘ boucle pour lire les données de la feuille 1 et les mettre
‘ dans le tableau «Z»
For i = 1 To n
   For j = 1 To ValNBRE
     Z(i, j) = Cells(i, j).Value
   Next
Next

‘ boucle pr prendre les val  2 par 2

For j = 1 To ValNBRE
   L = 1
   For i = 1 To n - 1
      X1 = X(i, j)
      X2 = X(i + 1, j)
      Y1 = Y(i, j)
      Y2 = Y(i + 1, j)
      Z1 = Z(i, j)
      Z2 = Z(i + 1, j)

      D = (((X2 - X1) ^ 2 + (Y2 - Y1) ^ 2) ^ 0.5) \ 1
      ‘D dist entre pt1 et pt2 pr repartir les pts supl tous les 1m
      MatriceX(L, j) = X1
      MatriceY(L, j) = Y1
      MatriceZ(L, j) = Z1

      If D >= 2 Then
            For k = 1 To D - 1
               MatriceX(L + k, j) = X1 + ((X2 - X1) * k / D)
               MatriceY(L + k, j) = Y1 + ((Y2 - Y1) * k / D)
               MatriceZ(L + k, j) = Z1 + ((Z2 - Z1) * k / D)
               Next
            L = L + D
         MatriceX(L, j) = X2
         MatriceY(L, j) = Y2
         MatriceZ(L, j) = Z2
         L = L + 1
      End If
      If D < 2 Then L = L + 1
   Next
Next

‘ ouverture nouvelle feuille pour mettre les résultats

Workbooks.Add

L = 1
UPPER = UBound(MatriceX, 1)

For i = 1 To UPPER
   For j = 1 To ValNBRE
      Cells(L, 1).Select
      If MatriceX(i, j) = «» Then Exit For
      ActiveCell.FormulaR1C1 = MatriceX(i, j)
      L = L + 1
   Next
   ‘ Sortie de boucle s’il n’y a plus de val dans toutes les col.
   PRFIN = 0
   For k = 1 To ValNBRE
   If MatriceX(i, k) <> «» Then PRFIN = PRFIN + 1
   Next
   If PRFIN = 0 Then Exit For
Next

L = 1
For i = 1 To UPPER
   For j = 1 To ValNBRE
      Cells(L, 2).Select
      If MatriceY(i, j) = «» Then Exit For
      ActiveCell.FormulaR1C1 = MatriceY(i, j)
      L = L + 1
   Next
```

```
    ' Sortie de boucle s'il n'y a plus de val dans toutes les col.
    PRFIN = 0
    For k = 1 To ValNBRE
    If MatriceX(i, k) <> «» Then PRFIN = PRFIN + 1
    Next
    If PRFIN = 0 Then Exit For
Next

L = 1
For i = 1 To UPPER
    For j = 1 To ValNBRE
        Cells(L, 3).Select
        If MatriceY(i, j) = «» Then Exit For
        ActiveCell.FormulaR1C1 = MatriceZ(i, j)
        L = L + 1
    Next
    ' Sortie de boucle s'il n'y a plus de val dans toutes les col.
    PRFIN = 0
    For k = 1 To ValNBRE
    If MatriceX(i, k) <> «» Then PRFIN = PRFIN + 1
    Next
    If PRFIN = 0 Then Exit For
Next
'
End Sub
```

ECOLE NATIONALE
DES SCIENCES
GEOGRAPHIQUES

POIVILLIERS E



RESTITUTEUR NUMERIQUE Version 5.3-o

Le restituteur fonctionne à partir d'un fichier modèle, fichier texte dans lequel sont rassemblées les informations nécessaires, éventuellement sous forme de référence à d'autres fichiers.

Le système utilise toute carte graphique compatible VESA, et fonctionne sous DOS.

Les images sont contenues dans des fichiers image de type BMP, TIFF (bande N/B pour l'instant) ou Caméra numérique .RAW (format « Thom »)

La visualisation stéréoscopique utilise, soit des lunettes rouge et vert (anaglyphes) soit des lunettes à cristaux liquides 3D-SPEX, connectées au port parallèle. Il est également possible (moyennant un peu de soudure…car la connectique n'est pas adaptée) de connecter un écran actif Stereographics ou Nuvision, ainsi que des lunettes infra-rouges Elsa 3D-Revelator.

Configuration requise et performances.

Le restituteur s'exécute sur un PC sous DOS, muni d'une carte graphique VGA (pas trop lente si possible...). La version basse résolution en mode VGA 320x200 n'est plus maintenue. Seule la version fonctionnant en mode VESA (ANAGLIHR.EXE) est disponible ; pour exploiter ce mode, il est indispensable de disposer d'une carte graphique dotée de 1 Méga de mémoire vidéo et d'un BIOS VESA 1.2 minimum (ou d'un driver équivalent), et au minimum d'un processeur P133 équipé de mémoire rapide.

Le déplacement subpixellaire et l'injection stéréoscopique couleur, implantés dans la version 5 du logiciel, tire parti de la présence de la technologie MMX des processeurs Pentium. Ce mode de déplacement peut toujours être activé, mais en l'absence de MMX, seuls des déplacements très lents seront lisses. Le subpixellaire est activé par défaut si MMX est détecté par le logiciel, inactivé dans le cas contraire.

Dans tous les cas, il faut être attentif aux points suivants:

Le programme implémente son propre mécanisme de mémoire virtuelle (directement dans les fichiers images), et doit disposer de suffisamment de mémoire physique disponible. Le passage par la mémoire virtuelle de Windows rend les performances catastrophiques (attention aux caractéristiques du PIF ou du raccourci lorsque le restituteur est lancé dans une fenêtre DOS de Windows). Le restituteur adapte son fonctionnement à la mémoire disponible, quitte éventuellement à diminuer la taille de la fenêtre de visualisation. Un bon compromis est d'attribuer environ 2MO de mémoire disponible par 1000 pixels en largeur d'image (la moitié suffit en cas de non utilisation de l'injection stéréoscopique en couleur).

Le système ne fonctionne pas sous Windows NT.

Sous Windows 95 ou 98, plusieurs problèmes peuvent se présenter, notamment liés à l'implémentation du BIOS VESA. Sur de nombreuses machines, ANAGLIHR fonctionne normalement dans une fenêtre DOS de Windows, à condition de configurer le raccourci avec une mémoire XMS (propriétés du raccourci - volet mémoire, case Mémoire étendue (XMS)-) égale à la mémoire physique nécessaire (tout en laissant au moins 10 MO disponibles pour Windows 95). Les autres catégories de mémoires peuvent être laissées sur Auto. Il peut cependant arriver que ANAGLIHR ne fonctionne pas dans ces conditions (écran noir, plantage nécessitant parfois un arrêt

physique du PC...).

Dans tous les cas, les performances seront plus satisfaisantes sous MSDOS (option 'redémarrer en mode MSDOS' de l'arrêt de Windows 95 ou touche F8 au boot). Les éventuels clignotements désagréables seront notamment supprimés. Il faudra alors utiliser le batch POIVRE.BAT fourni dans le kit d'installation pour configurer SmartDrive, et la souris. Dans cette nouvelle version, le réglage de la fréquence de l'écran est directement prise en compte par le logiciel dans le cas des cartes Matrox, ainsi que celle respectant le standard VESA 3 (comportant un processeur Nvidia TNT ou GE Force par exemple).

On a tout intérêt à accélérer les E/S disque, donc veiller à la défragmentation des fichiers image, et à la présence d'un cache disque adapté (Smartdrive avec 2 à 8 MO de buffer si on est directement sous DOS). Par contre , il n'est pas conseillé de mettre les images sur un volume disque compressé, ou sur un disque réseau.

Quoique optimisée, l'injection stéréoscopique de la restitution peut se révéler pénalisante si le dessin est trop long. De plus, la liste d'affichage est conservée en mémoire, et n'est donc pas indéfiniment extensible. Un message au lancement du programme donne le nombre approximatif de points stockables, et l'enregistrement de points excédentaires est impossible. On aura donc intérêt à fragmenter la restitution en plusieurs fichiers si nécessaire.

Une seconde souris (souris gauche SG) peut être connectée sur un port série (COM1 ou COM2). Lorsqu'elle est présente, le pilotage est modifié, et certaines fonctions sont reportées sur les boutons de la souris droite SD.

Elle sera identifiée automatiquement par le restituteur (sans driver), et ne doit pas être reconnue par Windows (qui a la fâcheuse habitude de combiner les deux souris) . Pour cela, il suffit de la désactiver dans le panneau de configuration :
dans le menu Système, onglet gestionnaire de périphériques, branche Souris, double cliquer sur Souris série, cocher la case «Désactiver dans ce profil matériel »).
Si la souris série n'apparaît pas dans la catégorie souris, il faut auparavant l'installer : dans le panneau de configuration, lancer « Ajout de périphérique », la procédure automatique détecte habituellement sans problème la souris. Il est alors possible de la désactiver comme indiqué ci-dessus.

La version 5 permet également de piloter le système à l'aide d'une souris à molette (testé pour l'instant avec Logitech Pilot Mouse). Cette souris doit être branchée sur le port série. La molette permet le contrôle altimétrique du ballonnet , ainsi que l'annulation des parallaxes.

Enfin n'oublions pas une paire de lunettes rouge à gauche et verte à droite...ou des lunettes 3D-SPEX branchées sur le port parallèle LPT1. Dans ce dernier cas, il est plus confortable d'utiliser un écran dont la fréquence de rafraîchissement est supérieure à 100Hz (les meilleurs résultats étant obtenus à 120 Hz). Il faut alors disposer d'une carte vidéo acceptant de modifier la fréquence d'affichage en mode VESA sous DOS (consulter le fichier FREQUENCE.TXT joint), ainsi que d'un moniteur supportant ces fréquences de balayage.

Fichiers de configuration de ANAGLIHR

Un certain nombre de données nécessaires au fonctionnement du restituteur sont stockées dans un fichier de configuration nommé **ANAGLIHR.INI,** qui doit se trouver dans le même répertoire que l'exécutable ANAGLIHR.EXE. Les variables définies pour l'instant sont les suivantes :

(les variables en notation hexadécimale doivent être précédées du signe $)

ImgDir : Même signification que la variable d'environnement correspondante (cf. infra) , plus facile à utiliser sous Windows 95 (les deux se concatènent).

ModeVideo : Mode VESA sous lequel on souhaite fonctionner. Il doit s'agir obligatoirement d'un mode utilisant des couleurs indexées (palette) 8 bits. La mémoire vidéo doit supporter au minimum 2 pages dans ce mode. Les modes couramment utilisés sont :

$100 : 640x400

$101 : 640x480

$103 : 800x600

$105 : 1024x768

Bien entendu, plus la résolution est élevée, plus le PC doit être puissant...

Fréquence : fréquence de rafraîchissement de l'écran en Hz. Se reporter au fichier FREQUENCE.TXT qui décrit les différentes fonctions de ce paramètre.

RTCI : Fréquence d'interruption de l'horloge temps réel qui pilote l'alternance stéréoscopique. Une fréquence élevée est préférable, sauf si le PC est lent, et prend trop de temps à traiter les interruptions. Choisir l'indice 7 ou 8 sur un 486, 4 à 6 sur un Pentium.

Souris2 : Indique sur quel port série rechercher la souris altimétrique : -1 détection automatique, 0 pas de souris alti, 1 ou 2 souris alti sur Com1 ou Com2.

LPT : Numéro du port parallèle (1 à 3) sur lequel sont branchée les lunettes stéréoscopiques. (par défaut LPT1).

Synchro : La synchronisation entre l'écran et les lunettes stéréoscopiques est gérée de façon différente suivant que le driver VESA de la carte vidéo est en version 1 ou 2. La commutation entre les deux modes est automatique. Cependant, certains drivers ne sont pas corrects, et la variable Synchro permet de forcer le mode correspondant (1 pour le mode hardware compatible VGA de VESA 1.2, 2 pour le mode software de VESA 2.0). Lorsque la carte supporte le mode 2, et que l'affichage des images gauche et droite n'est pas correct (une seule image visible, bandes dans les images, scintillement anormal), on peut essayer SYNCHRO=1. Il est souvent utile de se procurer une version récente du BIOS ou du driver VESA de la carte graphique sur le site WEB de son fabricant.

Molette : Utilisation d'une souris à molette de défilement (type Logitech Pilot)

DessinCouleur : écrase la valeur par défaut de l'injection stéréo, liée à la présence de l'option MMX du processeur. Sans valeur, ou = O, ou = Y, active la couleur , =N l'inactive.

SubPixel : idem pour le déplacement subpixellaire.

Langue : Extension du fichier de messages. Les messages du logiciel sont stockés dans un fichier propre à chaque langue, nommés ANAGLIHR.XXX, qui se trouve dans le répertoire des exécutables.

ANAGLIHR.FRA contient les messages en Français, ANAGLIHR.ENG en anglais. Si le fichier spécifié n'existe pas, ou est mal localisé, tous les messages seront remplacés par 'Message nn '.
SauveDessin : intervalle en minutes de sauvegarde automatique du dessin pendant l'exploitation.

Si l'on veut utiliser l'injection stéréo couleur, il faut fournir un fichier de correspondance code-couleur, nommé **CODE.COL**, qui sera recherché dans le même répertoire que le MDL, ou par défaut dans le répertoire de l'exécutable. Le fichier comprend des listes de plages de codes auxquelles seront affectées des couleurs. Les objets dont les codes ne sont pas affectés seront affichés en noir.

Le système recherche des informations dans le fichier **LICENCE.DAT**, qui doit se trouver dans le même répertoire que l'exécutable. Il n'est pas conseillé de le modifier...

Le fichier de base est le fichier modèle .MDL.

La variable d'environnement IMGDIR (même syntaxe que PATH) contient une liste de chemins d'accès où seront recherchés les différents fichiers nécessaires au logiciel - le répertoire par défaut étant systématiquement scruté avant ceux de la variable IMGDIR-.

Lorsque le logiciel demande un nom de fichier, la réponse ? permet l'affichage des fichiers existants ayant les extensions par défaut affectées à leurs types.

Si ce fichier n'existe pas au lancement du programme, il sera automatiquement créé (dans le répertoire par défaut sauf mention explicite), et rempli avec les réponses à quelques questions. Par contre, il est nécessaire de créer préalablement les fichiers caméra et appui.

Il évolue au fur et à mesures des phases, et les éléments marqués d'une étoile sont seuls présents au début, les valeurs précédées d'un tiret sont ajoutées en cours d'exploitation. L'état antérieur du fichier est conservé dans le fichier .MD#

* Nom de l'image gauche (.BMP par défaut)
* Résolution de scannage (en DPI)
* Nom de la caméra gauche, position (1 à 4)
* Nombre de repères mesurés (0 au début) (sauf caméra numérique)
- 6 coefficients d'orientation interne sur 2 lignes(sauf caméra numérique)
* Nom de l'image droite (.BMP par défaut)
* Résolution de scannage (en DPI)
* Nom de la caméra droite, position (1 à 4)
* Nombre de repères mesurés (0 au début) (sauf caméra numérique)
- 6 coefficients d'orientation interne sur 2 lignes(sauf caméra numérique)
* Nom du fichier terrain (.APP par défaut)
* Nom du fichier de dessin (.TRA par défaut)
* Précision plani, alti (en m) et cliché (en microns ou pixels si camera numérique), recouvrement (en %)
Options éventuelles (CONV= angle, REFRACTION=Y/N, COURBURE=Y/N)
* Nombre de points de mise en place (0 au début)
- pour chaque point, numéro, XD,YD,XG,YG en pixels
- Sommet droit
- Rotation droite
- Sommet gauche
- Rotation gauche
- Point de base modèle
- Rotation modèle terrain

Les Fichiers caméra comprennent :

-Les coordonnées du centre optique XC,YC,P en mm

-Les 3 coefficients de distorsion (polynôme $dR = aR^3 + bR^5 cR^7$, R et dR en mm)

-Le nombre de repères.

-Les coordonnées des repères de fond de chambre en mm

Dans le fichier MDL figure la position de l'image par rapport au certificat de calibration: 1 : l'image et le certificat sont dans la même position; 2 à 4 : l'image est tournée de 1 à 3 quarts de tour par rapport au certificat.

Remarque : Usage d'une caméra numérique. Anaglif reconnaîtra une caméra numérique à un nombre de repères nul. Dans ce cas, les coordonnées du centre devront être données en pixels (y compris la distance principale). La résolution de scannage sera automatiquement fixée à 25,4 et la matrice d'orientation interne n'apparaîtra pas dans le fichier modèle. L'orientation interne sera automatiquement omise.

Dans tous les cas, les coordonnées images en pixels sont pour origine l'angle inférieur gauche de l'image (convention des fichiers BMP).

Les fichiers appui

Numéro, code, X,Y,Z

le code est égal à 1 pour un point altimétrique seul

le code est égal à 2 pour un point planimétrique seul

le code est égal à 3 pour un point planimétrique et altimétrique

les champs X,Y, et Z doivent être remplis (avec 0 par exemple), même pour les codes 1 et 2

Mode opératoire

Dans toutes les phases de pointé, il est possible d'activer le pointé subpixellaire. Le déplacement de l'image se fait alors par incrément de ¼ de pixel, grâce à un ré-échantillonnage en temps réel de la totalité de l'image affichée . Le résultat des pointés est alors 4 fois plus précis à résolution d'image constante. La commande <CTRL X >permet d'activer ou inactiver à la demande ce mode de déplacement.

Lorsqu'un message demande l'entrée d'une valeur numérique, les éventuelles valeurs par défaut et valeur actuelle sont affichées entre parenthèses, séparées par un \. Si l'on répond par <CR>, la valeur par défaut sera adoptée.

Les images utilisées doivent permettre une observation stéréoscopique normale. Elles doivent notamment avoir l'axe des X Images grosso modo orienté dans le sens de l'axe de vol. Si ce n'est pas le cas, on utilisera l'utilitaire de rotation d'image sur disque ROTIMAGE, ou tout autre outil de traitement d'images approprié.

1/ Pointé des repères de fond de chambre.

En mode monocomparateur, l'image complète est accessible, tous les repères du cliché droit, puis le gauche. Le positionnement est automatique (sauf éventuellement sur le premier repère si l'image n'est pas centrée). On enregistre avec la barre d'espace ou le bouton gauche de la souris. Les repères non vus peuvent être sautés avec <esc>. Le calcul est automatiquement lancé après chaque mesure, le résultat étant utilisé comme prédicteur pour le repère suivant (la prédiction s'améliore donc au fur et à mesure), et l'enchaînement est automatique. A la fin de chaque cliché, l'écart type d'application est affiché. Toute valeur supérieure à 1 pixel est suspecte (mauvais pointé, défaut de géométrie du scanner, mauvaise introduction des coordonnées dans le fichier caméra) ; dans ce cas, le logiciel proposera une reprise des mesures. Si le problème persiste (absence de faute de mesure), il sera bon d'en chercher la cause physique.

Si des mesures externes des repères de fond de chambre sont disponibles, (corrélation automatique, détection de bords etc.) elles peuvent être prises en compte par le logiciel sans remesure. Il suffit de fournir pour chaque image un fichier de même nom et même chemin portant l'extension .REP, et contenant sur chaque ligne (en ASCII) le numéro et les coordonnées images (éventuellement subpixellaires) de chaque repère. Pour les photographies non métriques, l'utilitaire BORIMAGE permet de créer des repères fictifs par approximation des bords d'images par des droites. Il crée les fichiers .REP correspondants.

Cette phase est inutile et omise avec une caméra numérique.

2/ Orientation des images et mesure des points d'appui

Le logiciel se charge des orientations relative et absolue en une seule phase (orientation globale). Seules les parties communes des deux images sont affichées (sauf si le recouvrement a été

fixé à 100%). La mesure des points de parallaxe (inconnus) et des points d'appui (connus par certaines de leurs coordonnées terrain) est identique :

2.1 pilotage

Le déplacement simultané des 2 clichés a lieu à la souris . Pour l'annulation des parallaxes, le fonctionnement diffère suivant les commandes connectées :

- avec 1 seule souris, les boutons D et G de la souris SD permettent de ne déplacer qu'un seul des deux clichés,
- avec une souris à molette, la parallaxe en X est commandée par la roulette, la parallaxe en Y par la molette enfoncée
- avec deux souris celle de gauche commande directement les parallaxes en X et Y.

2.2 Enregistrement

Lorsque la parallaxe est annulée en X et en Y, (et que le point d'appui est pointé -si s'en est un), enregistrer avec la barre d'espace ou avec le bouton gauche de SD si SG est présente. Donner alors le numéro de point. S'il s'agit d'un point d'appui, lui donner le même numéro que dans le fichier .APP. Pour les points de parallaxe, il suffit de les enregistrer avec comme numéro un point <.> ; la numérotation sera automatique. Les points dont les numéros ne figurent pas dans le fichier d'appui .APP seront également considérés comme des points de parallaxe. Un numéro nul n'est pas pris en compte, un nouveau pointé avec le même numéro (éventuellement précédé de <.> pour les points de parallaxe) permet de remesurer. La commande D permet de supprimer le point.

Il est possible d'ajouter des points dans le fichier APP : il suffit de les enregistrer avec la touche + (ou de faire précéder leur numéro du caractère +). Le système demandera alors les coordonnées du point et son code d'activité (cela permet également de modifier les coordonnées ou le code d'un point existant).

Pour certaines applications spécifiques (étalonnage de caméra par exemple), il peut être utile de pointer certains points en monoscopie. Il suffit pour cela de faire précéder le numéro du point par les lettres L ou G pour des points mono sur l'image gauche, R ou D pour l'image droite. Ces points ne sont utilisés dans la mise en place que s'ils sont connus en XYZ , et uniquement dans la compensation finale. Ils se retrouveront dans le fichier MDL avec leur lettre distinctive et les deux coordonnées image mesurées.

Les points mesurés sont symbolisés dans la vue générale par un symbole dépendant de leur nature : croix pour les points de parallaxe, rectangle pour les points alti, triangle pointe en bas pour les points plani, triangle pointe en haut pour les points plani + alti.

2.3 Calcul

Après la mesure du sixième point, le calcul d'orientation peut être lancé par la commande <C>. Une orientation relative est calculée en premier lieu, les résidus de parallaxe sont affichés (tout résidu supérieur à 1 pixel est suspect). Si des points terrain ont été pointés en nombre suffisant, le

calcul se poursuit par une compensation globale par faisceaux. Si 3 points connus en XYZ ont été pointés, l'orientation absolue est compatible avec la photogrammétrie terrestre et aérienne (prise de vues orientées dans toute direction - attention, les 3 points ne doivent pas être alignés), sinon, si 2 points sont connus en XY et 3 en Z, le système se place en aérienne et suppose que l'axe est vertical descendant.

A l'issue du calcul d'orientation, les résidus de mesure sont listés par ordre croissant des résidus maximums. Les points les plus faux sont donc en fin de liste. Une procédure automatique de détection et d 'inactivation des fautes est alors exécutée et les points rejetés sont marqués d'une étoile. Il est bon de les corriger. Dans l'affichage réduit, les points actifs sont en vert, les points détectés comme faux sont symbolisés en rouge.

2.4 Déplacements automatiques

On peut se déplacer automatiquement sur un point avec les commandes <F>,<f>,<G>,<g>, ou <A>. La commande <F> permet de se déplacer automatiquement sur le point de mise en place le plus proche du ballonnet. Avec <G>, le point doit figurer dans le fichier d'appui, et le calcul de la première orientation globale doit avoir été fait, et on va sur ses coordonnées terrain. Avec <g>, le point doit avoir été mesuré, et on va sur ses coordonnées mesurées (point terrain ou de parallaxe). La commande <A>(orientation faite) permet se déplacer sur les points d'appui visibles dans l'image, mais non encore mesurés sans en connaître les numéros.

2.5 Corrélation numérique

Il est possible d'annuler automatiquement les parallaxes par corrélation automatique (commande <P> ou <Q>), en choisissant le cliché fixe à l'aide des fonctions d'affichage mono, en utilisant les boutons de la souris gauche, ou en utilisant les fonctions <CTRL><F1> et <CTRL><F2>. Lorsque l'on veut corréler sur une marque artificielle (point PUG), la commande <Q> ignore la partie centrale de l'imagette de corrélation. Il faut fixer le cliché contenant la marque, et on peut régler le rayon de la zone ignorée par un paramètre du corrélateur (par défaut, 100µ).

2.6 Options

Pour résoudre certains cas particuliers, des commandes d'option peuvent modifier le comportement du logiciel (pour l'instant, ces options ne sont pas conservées dans le fichier MDL, et doivent donc être émises à chaque réexécution du logiciel) :

< !>COUR=Y/O/N : prise en compte ou non de la courbure de terre

< !>REFRA=Y/O/N : idem pour la réfraction

< !>SOM entrée de coordonnées connues des sommets

< !>CONV entrée d'une convergence relative entre les axes

< !>TOLP modifie le poids planimétrique

< !>TOLA, TOLC id en alti ou mesures image

< !>ELIM modifie la tolérance d'élimination

2.7 Validation

Lorsque le modèle est jugé correct, passer à l'exploitation par <E>. La touche <Fin> sort sans valider le modèle (mais les mesures sont malgré tout inscrites dans le fichier, et le système demande confirmation).

3/ Exploitation

Après formation du modèle, on fonctionne en coordonnées terrain. La souris donne les X,Y modèle, les touches gauche et droite ou la seconde souris font varier l'altitude.

3.1Restitution graphique:

Il est possible de saisir des lignes codifiées, qui sont écrites en ASCII dans le fichier .TRA, et injectées en stéréoscopie dans l'image. La commande <i> permet d'inactiver ou réactiver cette injection. La commande <c> permet de commencer un objet avec un nouveau code, <C> de changer le code d'un objet désigné par le ballonnet, <CTRL C> de modifier la couleur associée à un code (une couleur nulle supprime l'injection du code correspondant).

Tout tracé déjà saisi antérieurement est injecté (le clipping est géré complètement en 3D, et l'on peut utiliser cette fonction pour faciliter les raccords de couple, même en terrestre). Le premier point de l'objet en cours de saisie est matérialisé par une croix, de même que les points isolés. Si l'injection des objets déjà saisis est gênante (réseau routier et bords de toit en surplomb), la commande <I> permet de n'injecter que les objets saisis récemment et à venir. La commande <E> permet d'(in)activer la liaison du dernier point à l'index de mesure.

3.2 Lissage des courbes

Deux points séparés de moins d'un pixel ne pourront pas être saisis. Par défaut, une rectification des lignes est opérée par le logiciel au fur et à mesure des mesures : les points dont la distance à la corde est inférieure à une certaine tolérance sont éliminés. Cette tolérance spatiale est équivalente à environ 1 pixel, elle peut être modifiée par la commande <CTRL E>. Si la tolérance est fixée à 0, cette rectification n'a pas lieu.

3.3 Fichier de dessin

Il est à tout moment possible de sauvegarder la restitution dans le fichier .TRA, grâce à la commande <CTRL S>. Un paramètre du fichier d'initialisation (SAUVEDESSIN) permet de demander une sauvegarde automatique à cadence fixe.

La commande d'option < !>TRA=I permet d'inclure les coordonnées image gauches et droites en fin de ligne du fichier TRA (en proportion de la largeur et hauteur d'image, donc comprises entre 0 et 1) (ce sont les coordonnées servant à l'injection stéréoscopique).

L'enregistrement se bloque lorsque la mémoire devient insuffisante. Dans ce cas, une seule solution : sortir, «dégraisser» le fichier de restitution, ou en créer un autre, et revenir dans ANAGLIF.

3.4 Fin d'objet :

La touche <ESC> ou le bouton droit de la souris permettent de terminer un objet en enregistrant le dernier point. De même le choix d'un nouveau code objet par <C>. Le numéro repasse à 1 à chaque fin de trait.

3.5 Accrochage et fermeture :

Il est possible de projeter (en 3D) l'index de mesure sur une ligne déjà saisie. La commande <a> recherche le sommet d'objet le plus proche, et y amène l'index si la distance est inférieure à la tolérance (modifiable grâce à <CTRL A>). La commande <A> projette l'index sur le segment d'objet le plus proche. Dans les deux cas, la confirmation vaut enregistrement. La commande <F> referme l'objet sur le premier point saisi.

3.6 Correction :

Pour corriger des éléments saisis, on dispose actuellement de deux possibilités : la commande <d > détruit (avec confirmation, en mettant l'élément en blanc) le dernier côté de l'élément en cours de saisie. Cette fonction n'est plus active dès que l'élément est terminé. La commande <D> doit être émise à proximité d'un objet (même tolérance que l'accrochage). L'objet désigné est détruit après confirmation.

3.7 Suivi de parcours prédéfini:

La commande <W> permet de suivre un parcours préenregistré dans un fichier .ITI. Il peut s 'agir d'une restitution précédente (fichier de même format que .TRA) ou du résultat d'un calcul. Dans ce mode, seule la commande altimétrique et le corrélateur restent actifs, il est impossible de se déplacer en planimétrie. Les points hors images sont automatiquement sautés, les points impointables (cachés par exemple) peuvent être sautés par <ESC>.

Si l'on demande la mesure automatique, tous les points du parcours présent dans le couple sont pointés en corrélation, sans validation par l'opérateur. Le corrélateur est mis automatiquement en fonction.

Il est possible de suspendre le parcours grâce à une seconde commande <W>. Le fichier résultat est sauvegardé avec indication du coefficient de corrélation obtenu au pointé, et une colonne supplémentaire, égale à 0 si le point a été repointé, différent sinon, ce qui permet de reprendre le même parcours, pour le compléter sur d'autres couples par exemple.

3.8 Corrélation numérique:

Trois outils sont proposés :

- La ligne de coordonnées affiche en permanence le coefficient de corrélation entre les deux images à l'emplacement du ballonnet, aussi bien en mode orientation relative qu'en restitution.

- La commande <P> permet le pointé isolé et fonctionne différemment suivant que l'on est en mode formation du modèle ou en exploitation. Lors de l'orientation, le cliché mobile (mode monoscopique

ou bouton de la souris gauche) se déplace de façon à annuler les parallaxes horizontales et verticales ; en exploitation il cherche le Z fournissant le maximum de corrélation à la position X,Y où l'on se trouve.

- La commande <Q> ou <q> asservit le Z au XY par corrélation (exploitation uniquement).
- <CTRL P>) : Paramétrage du corrélateur

½ taille de la fenêtre, (5 donne une fenêtre de 11 pixels)

Rayon de marque PUG (4 donne un diamètre de 7 pixels) –uniquement en mode orientation-

Nombre de pas de recherche (en parallaxe ou en Z suivant le mode) de part et d'autre de la position actuelle,

Pourcentage de validation de la corrélation (entre 0 et 100).

- Avec <P> et <Q> (exploitation uniquement), une fenêtre affiche en temps réel la courbe du coefficient de corrélation en fonction de l'altitude ; avec q la corrélation a lieu sans graphique.

- La corrélation est subpixellaire lorsque ce mode est en action. L'indication 'sp' apparaît à la suite du coefficient de corrélation. La courbe de corrélation est dédoublée dans sa partie centrale, (la courbe rouge correspondant aux valeurs subpixellaires).

3.9 Déplacements, blocages et rotation d'axes :

La fonction <G> permet de se déplacer sur des points connus en coordonnées : si l'on donne un numéro figurant dans le fichier de points d 'appui, on se rend sur le point correspondant. Si l'on ne donne pas de numéro, le logiciel demande les coordonnées du but. Si certaines d'entre elles sont omises, les coordonnées courantes du ballonnet sont utilisées. La fonction <+> permet d'ajouter (définitivement) le point courant dans le fichier d'appui. A titre d 'exemple, cette fonction peut être utilisée en survol pour préparer un couple plus détaillé, ou pour assurer le raccord d'un couple voisin.

Pour certains types de restitution (courbes de niveau, profils, sections planes quelconques), il est parfois nécessaire de limiter le déplacement du ballonnet à un plan : la fonction <N> permet ce blocage :

Pour définir le plan, plusieurs solutions sont disponibles :

X,Y, ou Z : blocage perpendiculairement à l'axe spécifié (Z pour faire des courbes de niveau)

O : blocage dans le plan moyen du dernier objet saisi (qui peut ensuite être éventuellement détruit !)

N : Blocage perpendiculairement à un vecteur donné.

<Retour> : Déblocage.

Une fois bloqué, il est toujours possible de lancer un déplacement automatique avec la commande <G>

En photogrammétrie terrestre, il est parfois utile de changer le système d'axes du pilotage (celui de la souris). La commande <CTRL R> permet de donner l'orientation de l 'axe des éloignements (les Z modèle), les autres seront choisis au mieux par le logiciel. La convention de dénomination des axes est identique à celle du blocage, avec en plus A, qui correspond à la bissectrice des axes de prise de vues (le plus ergonomique). Cette opération ne modifie pas les coordonnées terrain.

Touches et commandes

Touche (*=bascule)		OI	FM	EX	Fonction
!		X	X	X	Accès à la ligne de commande d'option
A/a/<CTRL>A				X	Accrochage sur un segment (A)/ un sommet (a) / rayon limite d'accrochage
A ,a			X		Recherche des points d'appui vus dans un modèle
B,b/<CTRL>B	*	X	X	X	Ballonnet Noir/Blanc/ automatique (en fonction du fond)
C,c		X			Centre Image
C,c			X		Calcul de l'orientation du modèle
C/c				X	Modification du code d'un objet désigné/entrée d'un nouveau code objet
<CTRL C>				X	Modification de la couleur associée à u n code
D,d			X		Suppression d'une mesure
D,d				X	Effacement de l'objet désigné /du dernier segment de l'objet en cours de saisie
E,e			X		Validation du modèle et passage en exploitation
E,e	*			X	Liaison du ballonnet au dernier point saisi
<CTRL E>				X	Tolérance de rectification des lignes
F,f			X		Déplacement sur le point de mise en place le plus proche
F,f				X	Fermeture d'un polygone
G/g			X	X	Déplacement sur un point (terrain : G , mesuré : g, FM uniquement)
i	*			X	Injection ou non du graphique dans l'image
I	*			X	Seuls les éléments enregistrés après la commande sont injectés
K,k/<CTRL> K		X	X	X	Rechargement des images avec LUT spécifique/ par défaut (min, max,contraste)
L/l/<CTRL> L		X	X	X	Augmentation/diminution/retour au défaut du contraste de l'image affichée
M			X		Annulation de parallaxe par le modèle
N,n				X	Blocage dans un plan (coupe, courbes de niveau)
<CTRL> N	*	X	X	X	Passage en négatif / positif
P,p			X	X	Pointé au sol par corrélation (et annulation de parallaxe en mode FM)
<CRTL> P			X	X	Choix des paramètres du corrélateur
Q/q	*			X	Asservissement au sol (avec graphique pour Q)
Q,q			X		Corrélation sur marque PUG
<CTRL R>				X	Modification de la rotation du pilotage
S,s	*	X	X	X	Déplacement rapide dans la vignette
<CtrlS>				X	Sauvegarde du fichier dessin
T,t	*	X	X	X	Change la taille du ballonnet
V/v/<CTRL> V		X	X	X	Augmente/diminue/remet au défaut la sensibilité souris/flèches
W,w	*			X	Déplacement automatique suivant un parcours préenregistré
X,x	*		X	X	Affichage Terrain, mm, pixel
<CTRL> X	*	X	X	X	Déplacement subpixellaire/pixellaire
Z/z/<CTRL> Z				X	Augmente/diminue/remet au défaut la sensibilité souris/flèches en alti
<Esc>		X			Saut d'un repère invisible
<Esc>				X	Dernier point d'un trait (ou point isolé)
<Espace>		X	X		Enregistrement
<Espace>				X	Enregistrement et dessin d'un trait
<+>			X	X	Ajout d'un point dans le fichier d'appui
<F1>/<F2>			X	X	Mono droit/gauche
<CRTL><F1>/ <CRTL><F2>			X		Image fixe gauche/droite ; le cliché fixe est rappelé sur l'afficheur
<F3>			X	X	Stéréo
<ALT> <F3>	*		X	X	Vignette stéréo /gauche /droite
<CTRL> <F3>	*		X	X	Visualisation Anaglyphe/lunettes LCD
<F4>		X	X	X	Recentrage de la fenêtre
<F5>	*		X	X	Ortho/Pseudo
<FIN>		X	X	X	Arrête tout

On peut également utiliser les commandes suivantes (qui fonctionnent même si l'on ne dispose pas de souris),

Touche (*=bascule)	O.I	F.M	Expl	Fonction
Flèches	X	X	X	= sourisG (XY)
<CTRL> Flèche		X		Bord d'image droit et gauche
<CTRL> <Home>		X		Bord d'image haut
<CTRL> <Fin>		X		Bord d'image bas
<Page Haut>/<Page Bas>		X		Parallaxe en X
<CTRL> <Page Haut>/ <CTRL> <Page Bas>		X		Parallaxe en Y
<Page Haut>/<Page Bas>			X	=Souris(Z)
<CTRL> <Page Haut>/ <CTRL> <Page Bas>			X	=Souris(Z) Rapide

Si la souris gauche SG est connectée, les boutons sont affectés de la façon suivante :

Phase	SG1	SG2	SD1	SD2	SD3
Or Interne	X,Y		Enregistrement	Invisible	
Formation modèle	X,Y généraux	X,Y parallaxe	Enregistrement	G/D Fixe	
Exploitation	X,Y	Z	Point courant	Fin de ligne	

Exemples de fichiers

Fichier modèle .MDL au début

```
pagan359.bmp
300
tmk.cam 1
0
pagan358.bmp
300
tmk.cam 1
0
pagan.app
pagan.tra
0.05 0.05 0.075  75
0
```

Fichier modèle .MDL après calcul

```
pagan359.bmp
300
tmk.cam 1
4
     11.7627687     -0.0239112     635.030
     -0.0206244     11.8638094     516.945
pagan358.bmp
300
tmk.cam 1
4
     11.7627841      0.1163215     612.029
     -0.0535043     11.9341102     524.452
pagan.app
pagan.tra
0.050  0.050 0.075 75
13
       .1      107       265       161       251
         1      143       256       197       242
        2      718       236       817       237
        3      792       246       876       249
        4     1023       261      1094       273
        5     1045       276      1098       288
        6      182       441       242       445
        7      973       425      1045       434
        8      287       518       315       528
        9      362       529       415       539
       10      564       524       630       532
       11      485       637       535       650
       12      696       435       793       441
     132.983     122.198     121.942
       .9965302       .0832242       .0012089
      -.0012170       .0000466       .9999993
       .0832241      -.9965310       .0001477
     126.151     122.737     121.861
       .9999707       .0076412      -.0001436
       .0001456      -.0002655       .9999999
       .0076412      -.9999707      -.0002666
     121.900     159.070     128.220
      1.0000000       .0000000       .0000000
       .0000000       .0000000      1.0000000
       .0000000     -1.0000000       .0000000
```

Fichier camera .CAM

```
 0 0 60.23
 0 0 0
4
-45.40     0.01
  0.01   -35.65
 45.82     0.00
  0.02    35.62
```

Fichier des points terrain .APP

```
 1  3  110.00    150.00    111.06
 2  3  133.93    150.00    111.05
 3  3  137.05    152.32    110.68
 4  1    0.00      0.00    111.14
 5  3  149.46    157.11    110.74
 6  2  111.49    150.35      0.00
 7  3  145.11    154.22    118.02
 8  3  109.84    160.82    121.96
 9  3  116.50    156.32    122.52
10  3  126.74    156.19    122.24
11  3  121.90    159.07    128.22
12  3  133.04     50.43    118.69
```

Fichier de dessin .TRA

```
     304       1  719816.063  146437.425      28.108
     304       2  719779.392  146397.241      30.287
     304       3  719756.381  146374.621      30.287
     304       4  719729.861  146354.730      30.287
     304       5  719702.951  146332.890      30.287
     304       6  719672.920  146312.610      30.287
     304       7  719651.334  146303.192      -1.124
     304       1  716884.908  146275.917      45.477
     304       2  717192.424  146493.078      45.477
     304       3  717216.080  146496.568      45.477
     304       4  717237.022  146495.017      45.477
     304       5  717275.029  146489.975      45.477
     304       6  717313.038  146484.157      45.477
     304       7  717352.600  146476.012      45.477
     304       8  717403.412  146461.272      45.477
     304       9  717474.011  146450.023      45.477
     304      10  717553.538  146440.712      45.477
     304      11  717645.098  146447.307      45.477
```

Fichier d'initialisation ANAGLIHR.INI

```
Modevideo  = $101
Frequence  = 90
RtcI       = 6
Imgdir     = c:\images;c:\restit
Souris2    = -1
lpt        = 2
Molette
DessinCouleur =  N
```

Fichier d'attribution des couleurs CODE.COL

```
{0 noir; 128 blanc}
{1-3 vert rouge bleu purs}
{4-6 cyan jaune magenta purs}
{7-9 vert rouge bleu foncés}
{10-12 cyan jaune magenta foncés}
{13-15 vert rouge bleu clairs}
{15-18 cyan jaune magenta clairs}
100-199 = 5
151     = 3
200-250 = 18
```

Fichier de définition du moniteur VIDEO.INI

```
TIMING =  640   8  24  144   400  6  3  24  200
TIMING =  640  32  64   96   480  1  3  21  200
TIMING =  800  48  96  128   600  1  3  32  200
TIMING = 1024  72 112  184   768  1  3  42  200
TIMING = 1280  72 152  224  1024  1  3  38  200
HFREQ  = 30 96
VFREQ  = 50 100
```

Complément d'installation du Poivilliers E :
==========

Une fois terminée l'installation, il reste à :

- recopier le fichier LICENCE.DAT de la disquette d'installation dans le répertoire de l'exécutable

- consulter le fichier de documentation DOC\ANAGLIF.DOC

- éditer les fichiers d'initialisation ANAGLIHR.INI et VIDEO.INI, pour configurer les options souhaitées (fréquence écran, répertoires, seconde souris, options diverses). Voir la doc.

- adapter le raccourci POIVILLIERS E en fonction de l'installation en ouvrant le volet propriété avec le bouton droit de la souris: répertoire de l'exécutable et de l'icone, mémoire XMS attribuée (voir la doc),

- En cas de démarrage hors WINDOWS, lancer le driver de souris MOUSE.EXE et SMARTDRV avec 4 MO de buffer si la mémoire installée est suffisante.

- En cas d'utilisation d'une carte Matrox, régler la fréquence de balayage sous WINDOWS. Se référer au mode d'emploi matrox\matrox.txt. Sinon, supprimer l'initialisation de la fréquence de balayage dans le raccourci (onglet programme, ligne fichier de commandes), ou se procurer un utilitaire de réglage de la fréquence en mode VESA auprès du fournisseur de la carte.

- Pour se procurer des lunettes 3D Spex, contacter l'importateur : THETASCAN, 6/8, rue de la Réunion - 91955 COURTABOEUF Cedex - FRANCE
Tél : 01 64 86 78 00 - International 33 1 64 86 78 00
Fax : 01 64 86 78 78 - International 33 1 64 86 78 78
www.thetascan.fr

- La visualisation stéréoscopique peut être également assurée par des lunettes à commande infra-rouge 3D REVELATOR, commercialisées par le fournisseur de cartes vidéo ELSA (moins chères et plus confortables que 3D SPEX). Pour leur connexion, consulter 3DRevelator.txt

- Pour se former à l'utilisation du logiciel, il existe un module spécialisé disponible dans le catalogue des actions de formation permanente de l'ENSG. Pour tout renseignement, consulter la page correspondante sur le site Web de l'école: http://www.ensg.ign.fr/Formation/Formation_Continue/Formations_externe/Catalogue_ext2000/Modules/Module_401.html

FREQUENCE:
==========

Le réglage de la fréquence de balayage sous DOS n'est pas une opération prise en charge par toutes les cartes, et souvent avec des méthodes différentes suivant les versions du BIOS et des drivers de la carte graphique.

Pour l'instant, ce réglage n'est disponible que pour les cartes MATROX, et, de façon beaucoup plus simple avec les cartes gérant le standard VESA 3 (cartes à base de processeurs NVidia par exemple). A partir de la version 5.3-o, le Poivilliers E se charge complètement du contrôle de fréquence du moniteur. En cas de problème il n'est jamais mauvais de se procurer la version la plus récente du BIOS et des drivers de la carte sur le site WEB du constructeur. Pour Matrox : http://www.matrox.com/mga/support/drivers/home.cfm et suivre scrupuleusement les instructions!

Réglage de la fréquence de rafraîchissement de l'écran:
==========

Plusieurs possibilités (par ordre de complexité):

- très simple :
Si la carte est conforme au standard VESA 3, (NVIDIA TNT ou GEForce) fournir dans le fichier VIDEO.INI les paramètres de l'écran : le Poivilliers E fera le reste, en prenant en compte le paramètre le plus contraignant.

!!ATTENTION!! Les cartes NVidia nécessitent le paramètre SYNCHRO=1 dans le fichier ANAGLIHR.INI

Exemple de fichier VIDEO.INI:
Pour chaque résolution, une ligne TIMING donnant, en X puis en Y, la résolution,[la longueur du front, de la synchro, et du retour], ainsi que la fréquence maxi acceptée pour cette résolution optionnellement, les limites de fréquence horizontale (en KHz) et verticale (en Hz) du moniteur. Si le paramètre FREQUENCE est présent dans ANAGLIHR.INI, il est ignoré si le la résolution choisie est décrite dans VIDEO.INI
TIMING = 640 8 24 144 400 6 3 24 200

```
TIMING =  640  32  64   96   480  1  3  21  200
TIMING =  800  48  96  128   600  1  3  32  200
TIMING = 1024  72 112  184   768  1  3  42  200
TIMING = 1280  72 152  224  1024  1  3  38  200
HFREQ  = 30 96
VFREQ  = 50 160
```

- un peu moins simple:

MATROX ou VESA 3

Si le Poivilliers E reconnaît directement la présence d'une carte Matrox (mais cela ne marche par tout le temps...), la fréquence indiquée dans ANAGLIHR.INI est directement communiquée à la carte; ATTENTION: Si cette fréquence est supérieure à la fréquence maximum de l'écran, celui-ci peut perdre la synchro, afficher un message, devenir noir, ou pire (je n'en ai jamais vu exploser...). Dans ce cas, la commande <CTRL F> reste active (en aveugle, puisqu'il n'y a plus d'écran...). Indiquer la fréquence en Hertz (85 par exemple), puis taper 3 fois <RETURN>. L'affichage doit revenir, recommencer l'opération en augmentant prudemment. Si le Poivilliers E ne reconnaît pas la carte (absence du mot MATROX dans la ligne de détection du standard VESA), on peut forcer ce fonctionnement en incluant la commande MATROX = Y dans ANAGLIHR.INI (il est possible de la même façon d'inactiver ce fonctionnement par la commande inverse).

- Si ça ne marche toujours pas :

MATROX UNIQUEMENT

Le kit d'installation fournit 3 petits exécutables résidents : 100Hz.com, 110Hz.com et 120Hz.com, à lancer avant le Poivilliers E (ne pas s'inquiéter du message annonçant le passage en 85 Hz, c'est le message qui n'a pas été modifié...).

- Bien plus compliqué :

NE FONCTIONNE PAS AVEC LES MATROX G400 et au delà:

Avec les drivers récents (Matrox G200) aller dans panneau d'affichage, propriétés d'affichage Matrox, onglet Moniteur, cocher Moniteur Matrox, propriétés, sélectionner un moniteur comparable à celui qui est utilisé (ou VESA), sélectionner la résolution (640x480, 800x600...) puis bouton Tester.

Avec certaines installations, ces fonctionnalités peuvent se trouver dans un onglet de propriétés de l'affichage (clic droit dans le fond du bureau).

La carte passe en mode test, bouton Editer les paramètres, modifier la fréquence verticale, et suivre les instructions.

Cette procédure crée un fichier nommé MGA.INF et placé dans \program files\matrox MGA PowerDesk\Mon\, qui contient les informations de réglage du moniteur. Editer le fichier MON.BAT pour faire pointer la variable MGA vers ce répertoire, et inclure le lancement de MON.BAT dans le raccourci (programme, fichier de commande). Pour les versions anciennes des drivers Matrox, cette opération est plus compliquée, il faut éditer à la main le fichier MGA.MON dont l'emploi est autodocumenté (mais assez délicat).

3D REVELATOR:

==========

La connectique prévue par ELSA n'est pas directement utilisable : elles fonctionnent normalement sur les seules cartes du fabricant, et avec un driver non documenté. Le Poivilliers E les commande comme les 3D SPEX par le port parallèle; Par contre, il faudra vous armer d'un fer à souder pour faire le petit adaptateur suivant:

Se procurer:

- une prise DB25 mâle (de câble d'imprimante)
- une prise Mini DIN 3 contacts femelle
- un bout de câble 3 conducteurs (les plus fins possible)
- un peu de soudure et beaucoup de patience

Regarder la prise Mini DIN de face (détrompeur en haut, carré en bas)

Relier le contact de gauche aux pattes 21 à 25 de la prise DB25 (masse)

Relier le contact du centre haut à la patte 4 de la DB25 (signal synchro)

Relier le contact de droite à la patte 5 de la DB25 (alim. 5v)

Refermer les prises et admirer...

Ce logiciel est fourni gratuitement, sans aucune garantie
de l'Institut Géographique National Français. Il ne doit pas être
disséminé sans l'autorisation expresse de son auteur.

Il a été créé dans un but pédagogique, et peut être utilisé
pour l'enseignement et la recherche. Son emploi dans une activité
commerciale ne saurait engager la responsabilité de
l'Institut Géographique National.

Tous droits réservés.

Contact : egels@ensg.ign.fr

Avril 2001

Classification géologique de Robert Marie

Géologie: lithologie classée en fonction de l'aptitude des roches à fournir des matériaux mobilisables pour les laves torrentielles d'après un travail de R. Marie sur la typologie des situations de danger (MARIE, 1992, non publié).

DENOMINATION	CARACTERISTIQUES ET EXEMPLES	CONSEQUENCES POUR LES LAVES TORRENTIELLES
Formations rocheuses cohérentes	Peu fracturées: un seul plan de fracturation ou un plan de stratification avec puissance de banc importante. Roche sédimentaires: calcaires massifs (type urgonien, tithonique), grès (grès d'Annot), molasse. Granites; gneiss. Roches volcaniques: diorites, roches vertes	L'érosion de telles formations conduit à: éboulis à gros blocs ou écroulements (barrages naturels intéressant pour bloquer les laves!). Prédominance d'éléments à granulométrie élevée → torrents à clappes (debris flows torrents).
Formations rocheuses fracturées	Fracturation: *plan de stratification et une ou plusieurs familles de fractures, *puissances des bancs peu importantes (inférieures au mètre), *deux ou plus de familles de fractures pour les roches non sédimentaires avec une maille inférieure au mètre. Exemple: les mêmes que précédemment mais fracturés -dolomies, quartzites, -calcaires marneux, -calcschistes et schistes, -conglomérats, brèches.	Donnent des éboulis à éléments prédominants inférieurs à un décimètre cube → torrents à clappes (debris flows torrents).
Formations rocheuses peu cohérentes	En général formées par une alternance de niveaux de compétence différentes (compétence = aptitude à résister à la déformation; emploi uniquement comparatif). Anisotropie importante (sens vertical) -marnes (terres noires), -schistes et grès (zone houillère) -schistes argileux (Lias)	La fraction argileuse joue le rôle d'un maillon faible. Teneur en argile importante qui permet de passer rapidement de l'état plastique à l'état liquide quand la teneur en eau augmente.
Formations meubles cohérentes	Formations superficielles (quaternaire) non ou très peu remaniées. Faciès argileux bien représentés, généralement issus de l'altération des formations en place: -moraines; à noter qu'avec le recul des glaciers, des volumes plus importants deviennent mobilisables, -alluvions, fluvio-glaciaires, -éboulis, colluvions, -produits d'altération: arène granitique, gore, altération des marnes.	Cohésion moins importante (formation de transport). Eléments fins prédominants. Facilement mobilisable (ravinement, glissement,…). Infiltrations possibles et circulation d'eau anarchiques. Risques de pressions interstitielles importantes favorisant les décrochements. Risque de décollement au niveau du substratum (influence de l'orientation des structures).
Formations meubles peu cohérentes	Toute formation ayant subi un mouvement gravitaire (écroulement, glissement, solifluxion, bassement, affaissement, fauchage, dépôt de coulées,…). Mouvements anciens (environ –10 000 ans) et actuels. Toute formation résultant d'un processus de vieillissement des versants. Faciès argileux très fréquents. Milieux fissurés, sans cohésion.	Déjà en mouvement! Avec comme moteur principal de ces mouvements: l'eau. Donc très facilement mobilisable.
Formations de roches solubles	Gypse essentiellement.	Fluage → écroulements, glissements. Influence sur la morphologie du lit: enfoncement et même disparition. Déstabilisation des berges. Influence sur la durée de vie des ouvrages et sur le choix de leur implantation.

Torrent du Manival
Fiche événement du service de la RTM du 30 avril 1968

Une très importante lave torrentielle s'est produite à la fin de cet hiver (probablement le 21 mars) dans la gorge du torrent du Manival.

Elle a entraîné un gros volume de matériaux qui se sont déposés au débouché du torrent sur son cône de déjection : de 400 m environ en amont de la baraque forestière jusqu'à 300 m en aval. Ces dépôts forment trois lentilles successives et juxtaposées. Leur hauteur atteint 5 à 6 m à proximité de la baraque sur une largeur de 20 m. L'épaisseur maximum se trouve au niveau des barrages successifs 23 – 22 et sont presque entièrement recouverts. Le volume total est difficile à évaluer, il est supérieur à 60 000 m^3.

Les dépôts comprennent des gros blocs de plusieurs mètres cubes, mélangés à des rochers de dimension variable, à des graviers, à de la neige…

Cette lave est en effet d'un type particulier. Il s'agit probablement d'une avalanche qui a entraîné des matériaux éboulés au cours de l'hiver. L'éboulement s'est produit non dans la falaise calcaire mais sur une des buttes qui jalonnent la gorge du Manival et qui sont formées d'un amoncellement hétérogène d'anciens dépôts d'allure morainique remaniés. La nature des matériaux transportés le montre et l'emplacement de la rupture est du reste visible dans la branche médiane.

La lave a marqué son passage sur les berges en couchant ou en arrachant les arbustes. On peut ainsi estimer à plus de 10 m sa hauteur maximum. Sa vitesse paraît avoir été assez faible et elle s'est arrêtée au changement de pente qui marque l'arrivée du torrent sur son cône.

Du fait que les ouvrages étaient encore recouverts d'une bonne épaisseur de neige, le choc a dû être bien amorti. On ne pourra toutefois se prononcer sur l'importance des dégâts qu'après le déblaiement. On signale qu'un ancien abri depuis longtemps abandonné a été emporté par la lave.

La thèse,
un long parcours...

THESE DE DOCTORAT

Titre de l'ouvrage :

ELABORATION D'UNE MÉTHODE DE PRÉDICTION DU VOLUME MAXIMAL D'UNE LAVE TORRENTIELLE (PREVENT)

Géomorphologie torrentielle,Topographie de terrain et Stéréophotogrammétrie sur photographies aériennes d'archives

Torrents du Manival, du Merdarêt et des Arches (Alpes-du-Nord, Isère, France)

Nom de l'auteur :

Stéphane VEYRAT-CHARVILLON

Laboratoires :

Géolab - Laboratoire de Géographie Physique - UMR 6042 CNRS
Maison de la Recherche, 4 rue Ledru, 63057 Clermont-Fd Cédex 1
Cemagref de Grenoble - U.R. Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches
Domaine universitaire, 2 rue de la papeterie, 38402 St-Martin-d'Hères

RÉSUMÉ

En ingénierie des risques torrentiels, les praticiens sont actuellement confrontés à un problème de gestion lié à la méconnaissance des volumes sédimentaires mobilisés par les crues. Généralement, les études cherchant à estimer ces volumes sédimentaires portent soit sur la production détritique des versants, soit sur la fourniture sédimentaire uniquement en sortie de bassin versant, mais rarement sur l'évaluation des stockages-déstockages le long du talweg ; elles ne fournissent donc pas de méthode (pluriel discutable) d'estimation des volumes sédimentaires satisfaisante. C'est pour répondre à ce questionnement des gestionnaires qu'est née cette recherche appliquée en géomorphologie torrentielle, basée sur la compréhension des processus de recharge et de transit sédimentaires au sein du chenal.

L'approche «globale» présentée ici peut être un complément aux travaux plus fréquents concernant la rhéologie et le comportement mécanique des matériaux, étudiés à une échelle plus fine, ainsi qu'aux études détaillées de certains processus géomorphologiques. Pour mener à bien ce travail, de nombreux outils ont été utilisés : photogrammétrie, observations de terrain et mesures topographiques, cartographie sur SIG et Modélisation Numérique de Terrain, géophysique, relevés pluviographiques et traitements statistiques, recueil d'archives. L'étude approfondie du bassin versant du Manival (Isère, Alpes-du-Nord) a permis de mieux comprendre le fonctionnement des processus sédimentaires et de mettre au point une méthode d'estimation des volumes en jeu. Cette méthode, qui permet de prédire le volume maximal d'une lave torrentielle majeure à venir (PREVENT), est basée sur une approche systémique et sur un concept du fonctionnement torrentiel privilégiant la dynamique sédimentaire du système.

La méthode de PREVENT a été par la suite appliquée à deux autres bassins versants isérois du même type, le Merdarêt et les Arches. L'étude diachronique des volumes sédimentaires de ces torrents montre que les résultats de la méthode proposée ont une cohérence satisfaisante. Cette thèse contribue à améliorer la connaissance scientifique des processus torrentiels, et par là même, apporte des outils théoriques et méthodologiques dans le domaine de l'ingénierie des risques naturels.

MOTS CLÉS

Torrent ; lave torrentielle ; lahar ; géomorphologie torrentielle ; transport solide ; volume sédimentaire ; bilan sédimentaire ; taux d'érosion ; méthode de Prédiction du Volume de l'Evénement Torrentiel (PREVENT) ; Restauration des Terrains en Montagne ; Manival ; Merdarêt ; Arches ; Alpes-du-Nord ; Isère

Cemagref
LA RECHERCHE POUR L'INGENIERIE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Cemagref - Groupement de Grenoble
Unité de Recherche Erosion Torrentielle Neige et Avalanches

GEOLAB

CLERMONT-FERRAND II
Université Blaise Pascal

Géolab - Laboratoire de Géographie Physique - Clermont-Ferrand
Unité Mixte de Recherche 6042 - CNRS - UBP

CNRS
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

PhD THESIS

Title :

ELABORATION OF A PREDICTING METHOD OF A MAXIMAL DEBRIS-FLOW VOLUME (PREVENT)

Torrent geomorphology, Stereophotogrammetry and field Topography measurements
Torrent basins of the Manival, the Merdarêt and the Arches (North-Alps, Isère, France)

Name of the author :

Stéphane VEYRAT-CHARVILLON

Laboratories :

Géolab - Laboratoire de Géographie Physique - UMR 6042 CNRS
Maison de la Recherche, 4 rue Ledru, 63057 Clermont-Fd Cédex 1
Cemagref de Grenoble - U.R. Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches
Domaine universitaire, 2 rue de la papeterie, 38402 St-Martin-d'Hères

ABSTRACT

In torrent risks engineering, the practitioners are at present confronted with a problem of management linked to the misunderstanding of the sediment volumes mobilized by the floods. Generally, the studies trying to estimate these volumes of sediment concern either the detrital production of slopes, or the sediment supply only in exit of the basin, but rarely the evaluation of the deposit-erosion along the talweg; they do not thus supply satisfactory methods of sediment volume estimation. It is in front of this questioning of the administrators that was born this applied research in torrent geomorphology, based on the understanding of the sediment processes of recharge and transit within the channel.

The “global” approach presented here can be complementary to the more frequent works concerning the rheology and the mechanical behavior of materials, which are applied using a more precise scale, as well as to detailed studies of certain geomorphological processes. To achieve this work numerous tools were used: photogrammetry, field observations and topographic measurements, maps on GIS and Digital Elevation Modelling, geophysics, pluviographics data and statistical treatments, and archive collections. The detailed study of the Manival watershed (Isère, North-Alps) allowed a better understanding of the functioning of the sedimentary processes and facilitated the finalization of a method of the available volume estimation. The method, which allows us to predict the maximal volume of a major debris-flow to come (PREVENT), is based on a systemic approach and on a concept of sediment dynamics within torrent system.

The method of PREVENT was afterwards applied to two other torrent basins of the same type in Isère, the Merdarêt and the Arches. The diachronic study of the sediment volumes of these torrents shows a satisfactory coherence of the results using the proposed method. This thesis thus contributes to improved scientific knowledge of the torrent processes, and brings with it theoretical and methodological tools into the field of natural risks engineering.

KEY-WORDS

Mountain stream ; creek ; debris-flow ; lahar ; torrent geomorphology ; sediment transport ; sediment budget ; erosion rate ; method of Predicting Volume of Torrent Event (PREVENT) ; torrent-control works ; Manival ; Merdarêt ; Arches ; French North Alps ; Isère

Cemagref - Groupement de Grenoble
Unité de Recherche Erosion Torrentielle Neige et Avalanches

Géolab - Laboratoire de Géographie Physique - Clermont-Ferrand
Unité Mixte de Recherche 6042 - CNRS - UBP