

# **THESE**

*Pour obtenir le grade de*  
**Docteur de l'Université Lumière Lyon 2**  
Discipline : Géographie, Aménagement et Urbanisme

*Présentée et soutenue publiquement par*

**Frédéric Liébault**

*Le 1<sup>er</sup> décembre 2003*

## **Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies)**

**Directeurs de Thèse :**

**M. Pierre Clément**

**Professeur émérite de Géographie à l'Université Lumière Lyon 2**

**M. Hervé Piégay**

**Chargé de recherche au CNRS, UMR 5600 Environnement-Ville-Société**

### ***JURY :***

**M. Jean-Paul Bravard**, Professeur de Géographie à l'Université Lumière Lyon 2

**M. Pierre Clément**, Professeur émérite de Géographie à l'Université Lumière Lyon 2

**M. Michel Goueffon**, Ingénieur en Chef du Génie Rural des Eaux et Forêts, Service RTM de Grenoble, adjoint au délégué national RTM

**M. G. Mathias Kondolf**, Professeur de Géographie à l'Université de Californie-Berkeley (rapporteur)

**M. Jonathan B. Laronne**, Professeur de Géographie à l'Université Ben Gurion du Negev

**M. François Petit**, Professeur de Géographie à l'Université de Liège (rapporteur)

**M. Hervé Piégay**, Chargé de recherche au CNRS-UMR 5600 Environnement-Ville-Société

<b>SOMMAIRE</b>	Pages
<i>Remerciements</i>	6
<i>Résumé</i>	12
<b>Introduction générale</b>	15
<b>1. Le cadre conceptuel</b>	19
<i>1.1. Système fluvial et hydrosystèmes: deux concepts complémentaires</i>	19
1.1.1. Généralités et définitions	19
1.1.2. Le changement morphologique : mode de fonctionnement du système fluvial	22
<i>1.2. Le cours d'eau de montagne : un système fluvial original</i>	25
1.2.1. Terminologie	25
1.2.2. Le fonctionnement morphologique des rivières torrentielles	27
1.2.2.1. Le versant « source »	27
1.2.2.2. Le versant « contrainte »	33
1.2.3. La charge de fond des rivières torrentielles	34
<b>2. Le cadre géographique</b>	39
<i>2.1. Diois et Baronnies : présentation générale</i>	39
2.1.1. Le cadre morphostructural, les héritages quaternaires et holocènes	39
2.1.2. Le cadre climatique et hydrologique	44
2.1.2.1. Le cadre climatique	44
2.1.2.2. Le cadre hydrologique	46
<i>2.2. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises et leurs émissaires</i>	53
2.2.1. La Drôme, l'Eygues et le Roubion : des rivières en cours d'incision	53
2.2.2. Caractéristiques des petites rivières torrentielles des montagnes drômoises	55
<b>3. Le cadre méthodologique</b>	63
<i>3.1. Les sources d'information</i>	63
3.1.1. Les sources documentaires	63
3.1.2. Les informations de terrain	64
<i>3.2. Les procédures d'échantillonnage</i>	65
<i>3.3. Les outils de traitement de l'information</i>	67
3.3.1. Les outils statistiques	67
3.3.2. Les outils cartographiques	69
<b>Première Partie :</b>	
<b>les changements fluviaux contemporains dans leur environnement</b>	71
<b>Introduction</b>	72
<b>1. Les changements fluviaux contemporains</b>	73
<i>1.1. Approches méthodologiques</i>	73
1.1.1. Analyses diachroniques documentaires des bandes actives	73
1.1.1.1. Les anciens documents topographiques et cartographiques des Ponts et Chaussées	73
1.1.1.2. Les photographies aériennes	74
1.1.2. Relevés de terrain des formes fluviales résiduelles	84
1.1.2.1. Les relevés topographiques	84
1.1.2.2. Les techniques de datation	85
<i>1.2. La rétraction des bandes actives</i>	89
1.2.1. Les tendances générales d'évolution	89
1.2.1.1. La période 1948-1991(96)	89
1.2.1.2. Evolutions depuis 1850	97
1.2.2. L'organisation géographique du changement fluvial	101
1.2.2.1. Comparaisons régionales	101
1.2.2.2. Structures longitudinales du changement	104

## Sommaire

1.2.3. Analyses morphologiques et datations des changements fluviaux	109
1.2.3.1. Morphologies anciennes et actuelles	109
1.2.3.2. Les datations dendrochronologiques	121
1.2.3.3. Les datations radiométriques	125
<b>1.3. Synthèse sur les changements fluviaux contemporains</b>	<b>127</b>
<b>2. Les changements de l'environnement</b>	<b>131</b>
<b>2.1. Correction torrentielle et changements de l'occupation du sol</b>	<b>131</b>
2.1.1. Historique et bilan de la Restauration des Terrains en Montagne	131
2.1.1.1. Etat de la question	133
2.1.1.2. Approches méthodologiques	135
2.1.1.3. Les différents types de travaux réalisés	138
2.1.1.4. Chronologie des travaux	142
2.1.1.5. Répartition spatiale des travaux	144
2.1.1.6. Travaux RTM et extinction torrentielle	146
2.1.2. Les changements de l'occupation du sol et le tarissement des sources sédimentaires	147
2.1.2.1. Etat de la question	147
2.1.2.2. Approches méthodologiques	148
2.1.2.3. Tendances générales d'évolution et disparités régionales	153
2.1.2.4. La reconquête forestière et la stabilisation des sources sédimentaires	158
2.1.3. La nature et l'influence des changements de l'occupation du sol	161
<b>2.2. Changements hydrologiques séculaires</b>	<b>163</b>
2.2.1. Etat de la question	163
2.2.2. Approches méthodologiques	165
2.2.3. Evolution des crues de la Drôme à Luc-en-Diois depuis 1907	165
2.2.4. La nature et l'influence des changements hydrologiques	168
<b>3. Synthèse explicative des changements fluviaux contemporains</b>	<b>173</b>
3.1. La période 1850-1950	173
3.2. La période 1950-2000	174
<b>Deuxième Partie :</b>	
<b>Morphologies fluviales et bassins versants</b>	<b>179</b>
<b>Introduction</b>	<b>180</b>
<b>1. Approches méthodologiques</b>	<b>183</b>
1.1. Identification visuelle des types morphologiques	183
1.2. Les relevés morpho-sédimentaires	185
1.3. Détermination des caractéristiques des bassins versants	187
1.3.1. Les indicateurs morphométriques	187
1.3.2. Les indicateurs de relief et d'exposition	189
1.3.3. Les indicateurs géologiques	191
1.3.4. Les indicateurs de l'occupation du sol	193
1.3.5. Les indicateurs géomorphologiques	194
1.4. Approches statistiques	198
<b>2. Typologie morphologique</b>	<b>199</b>
2.1. Les lits à fond rocheux (morphotype E)	199
2.2. Les lits à blocs (morphotype D)	199
2.3. Les lits à fond plat grossier (morphotype C)	200
2.4. Les lits à fond plat caillouteux (morphotype B)	201
2.5. Les lits à nappes caillouteuses (morphotype A)	201
<b>3. Discrimination des morphotypes à partir des caractéristiques du tronçon</b>	<b>207</b>
3.1. Descriptions statistiques élémentaires	207
3.1.1. Les indicateurs morphologiques	207
3.1.2. Les indicateurs granulométriques	211
3.1.3. Les indicateurs dynamiques	213

## Sommaire

3.2. Discrimination à partir de relations statistiques élémentaires	216
3.3. Discrimination multivariée	223
3.4. Interprétation fonctionnelle	227
<b>4. Discrimination des morphotypes à partir des caractéristiques du bassin versant</b>	<b>233</b>
4.1. Discrimination par analyse inter-classe	233
4.2. Interprétation fonctionnelle	239
<b>5. Conclusion</b>	<b>243</b>
	245
<b>Troisième Partie :</b>	
<b>Le transport de la charge de fond</b>	
<b>Introduction</b>	<b>247</b>
<b>1. Les sites d'étude</b>	<b>249</b>
1.1. Présentation générale des bassins versants	249
1.1.1. Contexte morphostructural et implications géomorphologiques	249
1.1.2. Contexte hydrologique	256
1.1.3. Contexte historique	256
1.2. Présentation des tronçons de mesure	260
<b>2. Le dispositif de suivi</b>	<b>263</b>
2.1. Le suivi de la charge de fond	263
2.1.1. Principes de mesure	263
2.1.2. Le dispositif de mesure	266
2.1.3. Evaluation de la précision des mesures	269
2.2. Le suivi hydrologique des crues	272
2.2.1. Les sites de mesure	272
2.2.2. Le dispositif de mesure	273
2.3. Le suivi des précipitations	277
<b>3. Les fréquences et seuils de mise en mouvement de la charge de fond</b>	<b>279</b>
3.1. Fréquences inter-annuelles et occurrence saisonnière du charriage	279
3.2. Seuils de mise en mouvement de la charge de fond	282
3.3. Synthèse	292
<b>4. Les distances de transport de la charge de fond</b>	<b>295</b>
4.1. Approche événementielle	295
4.2. Distances annuelles de transport	305
4.3. Synthèse	308
<b>5. Les volumes charriés</b>	<b>311</b>
5.1. Approche événementielle	311
5.2. Charriages annuels	316
5.3. Synthèse	321
<b>6. Estimation de la recharge sédimentaire à l'échelle régionale</b>	<b>323</b>
<b>7. Conclusion</b>	<b>329</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>333</b>
<i>Bibliographie</i>	341
<i>Liste des figures</i>	359
<i>Liste des tableaux</i>	371

## **TROISIEME PARTIE**

### **Le transport de la charge de fond**

- 1. Les sites d'étude***
- 2. Le dispositif de suivi***
- 3. Les fréquences et seuils de mise en mouvement***
- 4. Les distances de transport***
- 5. Les volumes charriés***
- 6. La recharge sédimentaire à l'échelle régionale***
- 7. Conclusion***

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

## INTRODUCTION

La dernière partie de la thèse est consacrée au transport de la charge de fond à l'échelle de l'événement de crue sur trois affluents de la rivière Drôme : l'Esconavette, la Barnavette et la Béoux. Ces trois organismes torrentiels se distinguent par le maintien des bancs alluvionnaires à proximité de l'exutoire et par la présence de grands dérochoirs dans les hauts bassins. Ces éléments nous conduisent à les considérer comme de gros pourvoyeurs potentiels de charge de fond, conformément aux conclusions qui viennent d'être énoncées à l'issue de la deuxième partie consacrée à l'analyse des formes fluviales actuelles. Les sites sur lesquels nous avons implanté nos stations de mesure présentent tous une morphologie de type A, à nappes caillouteuses continues. La mesure du transport solide dans un tel contexte nous permet de déterminer les volumes de sédiments grossiers en mouvement associés à des formes fluviales en voie de disparition dans les Préalpes drômoises. Ce choix méthodologique se justifie pour plusieurs raisons. Dans un premier temps, il permet de quantifier la recharge en matériaux grossiers en provenance de quelques affluents dont le transport solide enregistré, a priori, parmi les plus fortes valeurs du bassin. Les extrapolations à l'ensemble des affluents donneront ainsi des évaluations hautes de la recharge qui pourront être comparées avec le transport solide actuel des émissaires principaux. Ceci doit nous conduire à proposer un bilan sédimentaire fondé sur une quantification optimiste des apports. L'inverse aurait été préjudiciable compte tenu du contexte qui suggère une situation de déficit sédimentaire à l'échelle du bassin versant. Dans un deuxième temps, ces types morphologiques offrent des conditions de mesure favorables à la mise en œuvre de techniques de suivi identiques, souples et peu onéreuses, ce qui est un avantage certain étant donnée la complexité inhérente au suivi de la charge de fond dans les rivières graveleuses [Reid *et al.*, 1997]. Un suivi en parallèle des morphologies à blocs aurait nécessité l'utilisation de techniques différentes, difficiles à mettre en œuvre d'un point de vue logistique et impliquant des problèmes en terme de comparaison des résultats.

La démarche métrologique qui a été adoptée entre dans la catégorie des approches morphologiques qui consistent à déterminer les volumes de sédiments mobilisés à partir des modifications topographiques qui affectent les formes fluviales pendant les crues [Ashmore et Church, 1998]. La technique utilisée combine l'enregistrement des processus d'érosion et de remblaiement le long d'un profil en travers et la mesure des distances parcourues par les sédiments grossiers [Laronne *et al.*, 1992]. Elle présente l'avantage de procurer, en plus des volumes mobilisés, des informations intéressantes sur les profondeurs de remaniement du lit et sur les distances annuelles parcourues par la charge de fond. Ces données fondamentales pour la compréhension des processus de transferts sédimentaires dans les lits fluviaux sont quasi-inexistantes dans les Alpes françaises alors que des questions cruciales concernant la gestion de la ressource sédimentaire ont émergé ces dernières années avec la mise en évidence des problèmes liés à l'incision des rivières [Bravard, 1991 ; Bravard *et al.*, 1999 ; Piégay et Stroffek, 2000].

Nous proposons donc de présenter dans cette troisième partie les résultats et les enseignements de

### **Troisième Partie: Le transport de la charge de fond**

6 années de suivi de la charge de fond (1997-2002). Les nombreux relevés de terrain, effectués après chaque événement de crue survenu pendant cette période, ont été effectués avec l'assistance financière et logistique de l'Office National des Forêts de la Drôme.

## 1. Les sites d'étude

### 1.1. Présentation générale des bassins versants

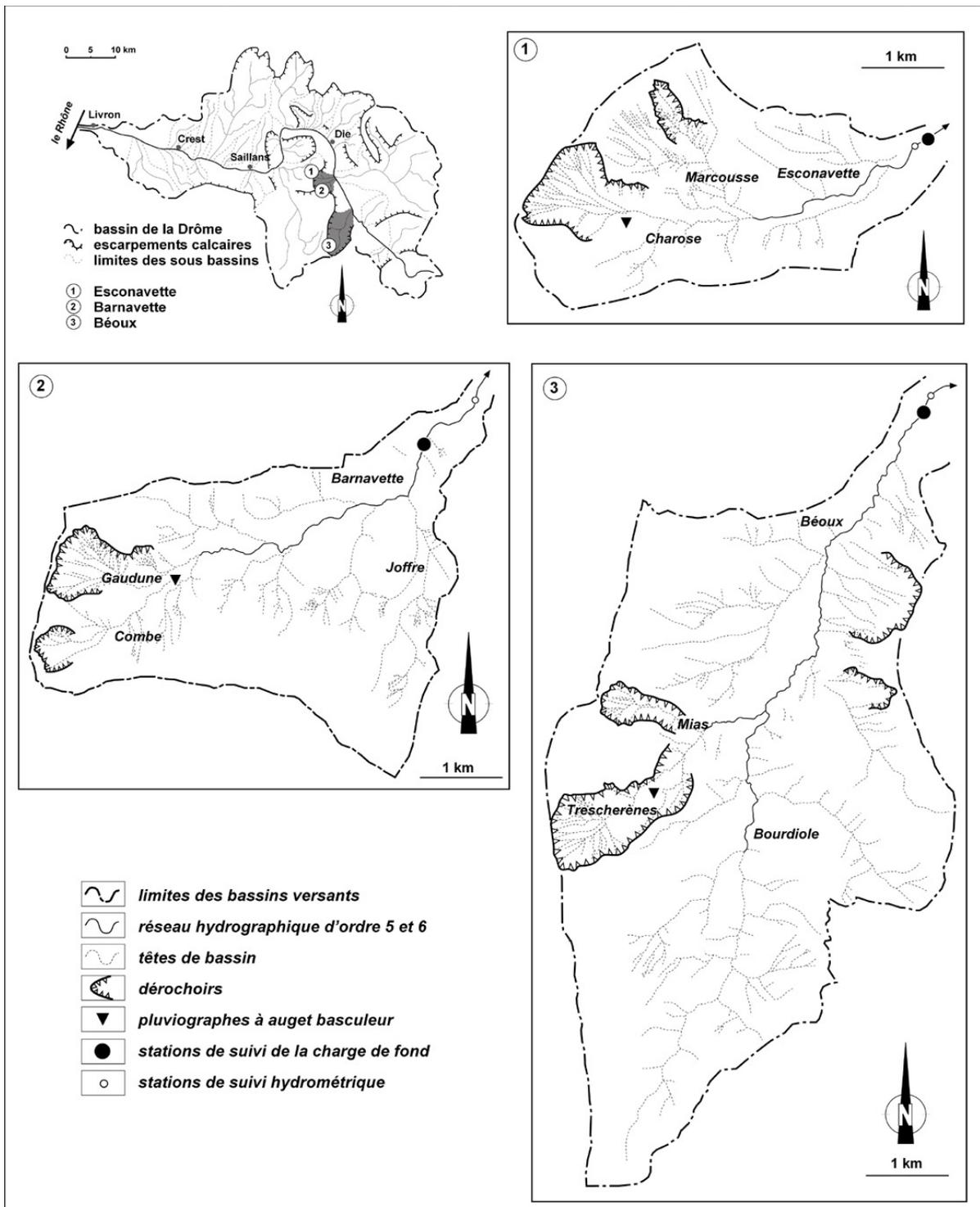
#### 1.1.1. Contexte morphostructural et implications géomorphologiques

Les ruisseaux de l'Esconavette (Montmaur-en-Diois), de la Barnavette (Barnave) et de la Béoux (Poyols et Jonchères) sont des affluents de rive gauche de la Drôme dont les bassins versants présentent des surfaces respectives de 10, 14 et 28 km<sup>2</sup> (Fig. 114). Les principales caractéristiques des aires de drainage permettent de décrire quantitativement les similitudes et les différences biophysiques et historiques (Tab. 35).

Ces trois bassins s'inscrivent dans une configuration morphostructurale identique. Ils correspondent à des reculées qui entaillent le front occidental de la combe anticlinale de Die, cette vaste dépression méridienne de terres noires. Ils se sont formés dans des alternances de marnes, de marno-calcaires et de calcaires marneux d'âge jurassique, peu résistants et à pendage relativement faible (Fig. 115). Ce contexte géologique, marqué par une certaine fragilité, explique la formation de ces grandes indentations qui constituent aujourd'hui de véritables systèmes hydro-géomorphologiques au fonctionnement propre. Les têtes de bassins se sont organisées en un réseau dense de ravins qui définissent de vastes bassins de réception torrentiels. Ces dépressions en forme d'amphithéâtres, que l'on désigne sous le terme de dérochoirs, sont la résultante d'un ravinement intense qui a pris naissance dans les versants marneux du front de combe et qui s'est propagé jusqu'aux crêts de calcaire massif, aujourd'hui déstabilisés par le processus d'érosion régressive [Descroix, 1994]. Compte tenu des taux d'ablation actuels mesurés dans les formations marneuses des Préalpes du Sud, qui sont situés entre 0,5 et 1 cm an<sup>-1</sup>, il est possible d'avancer une datation des grands dérochoirs, en faisant l'hypothèse que ces vitesses de dénudation s'appliquent aux périodes passées. On a pu ainsi penser que ces amphithéâtres ont commencé à se former au début de l'Holocène [Descroix, 1994]. Ils résulteraient alors probablement du changement de régime morphoclimatique qui s'est produit à cette période, les processus d'érosion linéaire sous climat tempéré prenant progressivement le relais des processus d'érosion aréolaire du système périglaciaire [Moissenet, 1969].

Ce contexte morphostructural explique bien des similitudes en terme de relief, de morphométrie et de composition lithologique. Il faut cependant noter quelques différences qui peuvent prendre de l'importance lorsqu'il s'agit d'examiner la dynamique des transferts sédimentaires internes (Tab. 35). L'Esconavette présente une pente supérieure dans le fond de vallée drainé par les segments d'ordre supérieur. Ceci implique des conditions de transport plus efficaces entre la zone principale de convergence des têtes de bassin et l'exutoire. Le bassin de la Béoux se caractérise par des altitudes extrêmes plus fortes, qui suggèrent une météorisation cryoclastique plus active dans l'enceinte des dérochoirs. Les valeurs de la densité de drainage et du nombre de têtes de bassin par unité de surface sont légèrement plus fortes sur l'Esconavette. Ceci est à mettre en relation avec l'emprise spatiale des marnes et pourrait induire une réponse hydrologique plus rapide et plus intense par rapport

aux deux autres bassins. Il faut enfin souligner la configuration particulière du bassin de la Béoux qui se compose d'un système torrentiel actif relié à deux dérochoirs (Torrents du Mias et de Trescherènes), couplé à un sous-bassin forestier, exempt de grandes formes d'érosion (Ruisseau de Bourdiolo).



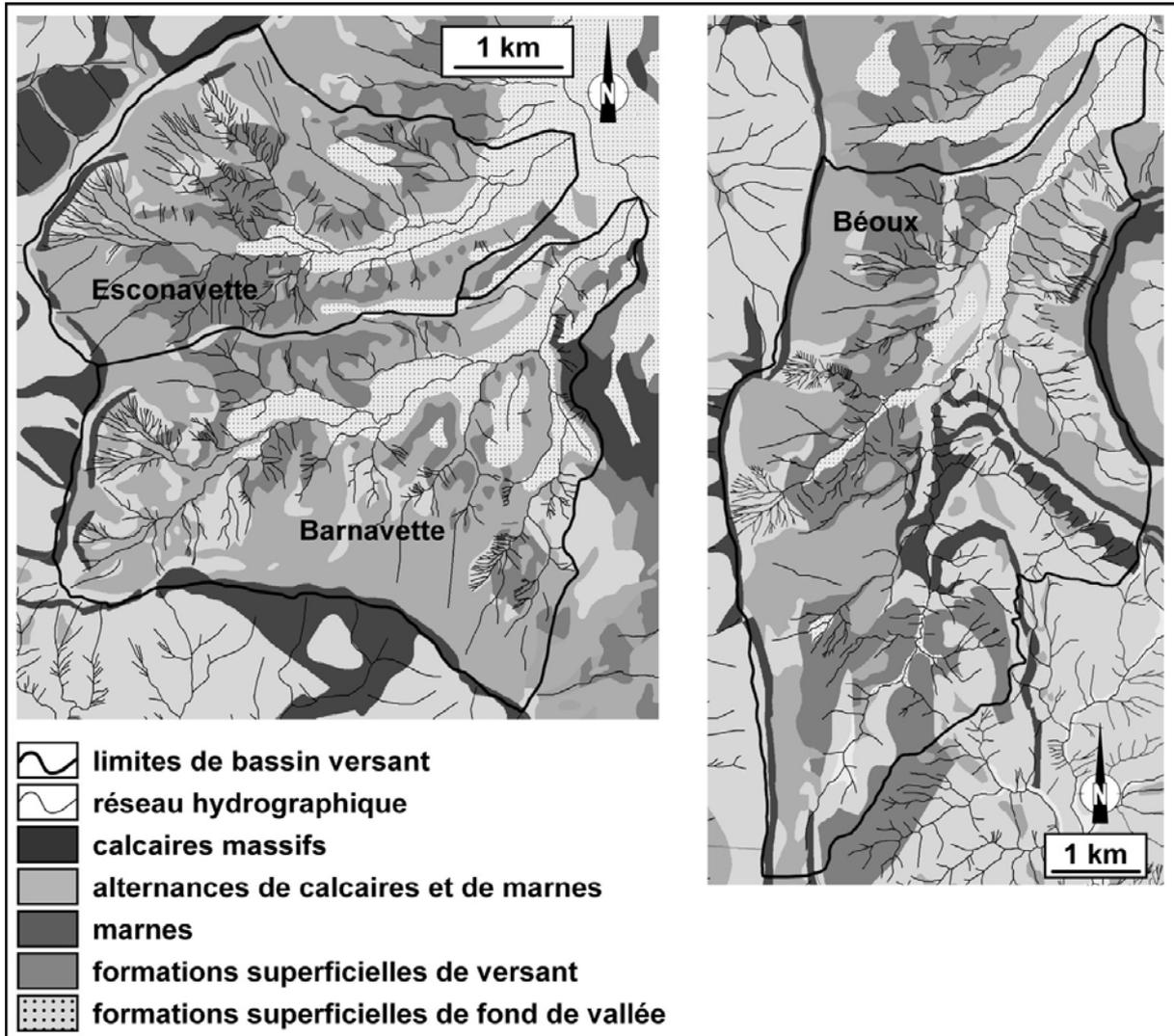
**Figure 114**  
Carte de présentation générale des bassins versants de l'Esconavette, de la Barnavette et de la Béoux

**Tableau 35***Principales caractéristiques des bassins versants de l'Esconavette, de la Barnavette et de la Béoux*

	Esconavette	Barnavette	Béoux
Ordre à l'exutoire <sup>1</sup>	5	5	6
surface (km <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	9,77	14,06	28,27
altitude moyenne (m) <sup>3</sup>	753	754	977
altitude maximale (m) <sup>2</sup>	1273	1340	1570
ratio de relief <sup>2</sup>	0,14	0,13	0,09
Pente du fond de vallée (segments d'ordre 5 ou 6) <sup>2</sup>	0,035	0,030	0,031
surfaces supérieures à 1000 m (%) <sup>3</sup>	13,68	14,27	45,93
densité de drainage (km km <sup>-2</sup> ) <sup>2</sup>	6,84	5,56	4,58
nombre de segments d'ordre 1 par unité de surface (nb km <sup>-2</sup> ) <sup>2</sup>	23	21	14
taux de boisement (%) <sup>4</sup>	70,87	70,69	77,90
calcaires (%) <sup>5</sup>	2,26	7,84	9,18
marnes (%) <sup>5</sup>	23,71	13,79	20,68
marno-calcaires (%) <sup>5</sup>	8,52	15,07	29,89
formations superficielles de versant (%) <sup>5</sup>	47,84	50,36	32,67
formations superficielles de fond de vallée (%) <sup>5</sup>	17,66	15,95	7,58
sources sédimentaires (%) <sup>6</sup>	8	7	6
reboisements RTM (%) <sup>7</sup>	10,34	15,72	12,03
seuils et barrages RTM historiques (nb km <sup>-2</sup> ) <sup>8</sup>	30	23	14
barrages RTM actuels (nb) <sup>9</sup>	0	16	21
colonisation forestière et arbustive entre 1850 et 1950 (%) <sup>10</sup>	44,18	35,46	54,17
colonisation forestière entre 1950 et 1990 (%) <sup>10</sup>	24,81	25,38	32,37

1. déterminé selon la méthode de Strahler [1957] sur les cartes topographiques au 1/25 000<sup>ème</sup>
2. d'après les cartes topographiques au 1/25 000<sup>ème</sup>
3. d'après un modèle numérique de terrain à pas de 100 m
4. d'après l'Inventaire Forestier National de 1991
5. d'après les cartes géologiques au 1/50 000<sup>ème</sup> (BRGM)
6. d'après les photographies aériennes de 1991 au 1/17 000<sup>ème</sup>
7. d'après l'enquête RTM de 1964
8. d'après les comptes permanents RTM (1860-1978)
9. d'après les reconnaissances de terrain
10. d'après le cadastre napoléonien, l'enquête agricole de 1954, et Corine Land Cover 1992

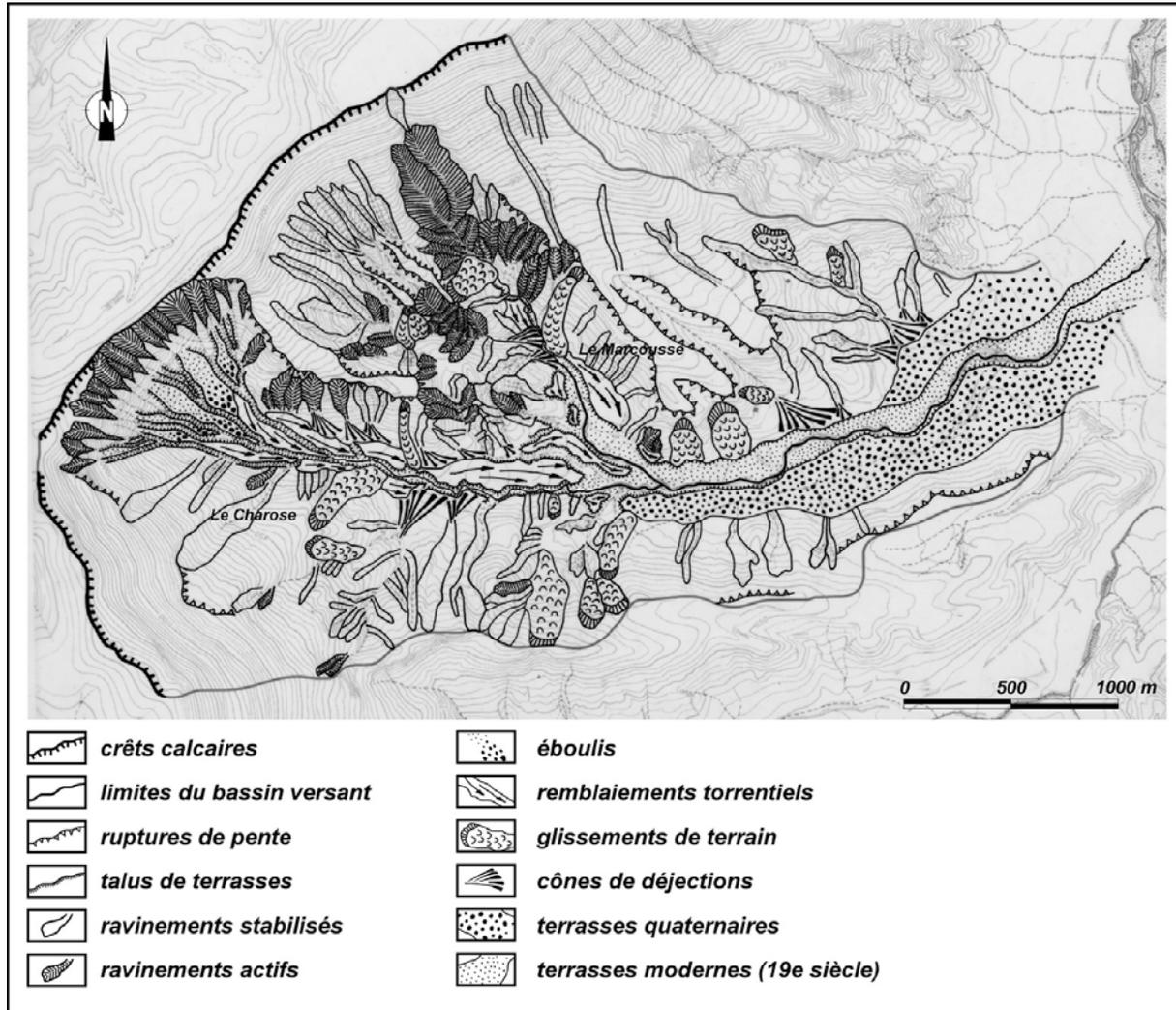
Une cartographie géomorphologique détaillée de chaque bassin a été réalisée à partir des photographies aériennes à grande échelle de 1991 (1/17000<sup>ème</sup>) qui constituent les documents photographiques récents les plus précis dont nous disposons sur le secteur d'étude. Ces clichés permettent de caractériser les principales formes d'érosion et de dépôt rencontrées (Fig. 116, 117 et 118). Ils contribuent également à bien identifier l'emprise et l'organisation spatiale des sources sédimentaires. Ces cartes montrent clairement que les sédiments grossiers qui circulent dans ces rivières proviennent principalement des ravinements actifs situés dans l'enceinte des dérochoirs. L'Esconavette est alimentée par le bassin de réception du Torrent de Charose (Fig. 116). Les nombreuses têtes de bassin incisées dans les tabliers d'éboulis convoient les sédiments directement depuis la barre rocheuse jusqu'à l'Esconavette (Fig. 29A). Les ravinements du Marcousse, qui progressent au détriment des marnes et des calcaires marneux, n'ont pas encore atteint les calcaires du Tithonique et ils produisent donc essentiellement des sédiments fins. Néanmoins, la présence de 2 glissements de terrain qui ont déstabilisé les accumulations périglaciaires de recouvrement des glaciers participent à la recharge du torrent en sédiments grossiers. La Barnavette dispose d'un grand dérochoir actif, drainé par le Torrent de Gaudune. Ce dispositif est complété par les apports du Torrent des Combes, dont les sédiments proviennent d'un petit amphithéâtre actif et de 2 glissements de terrain situés de



**Figure 115**

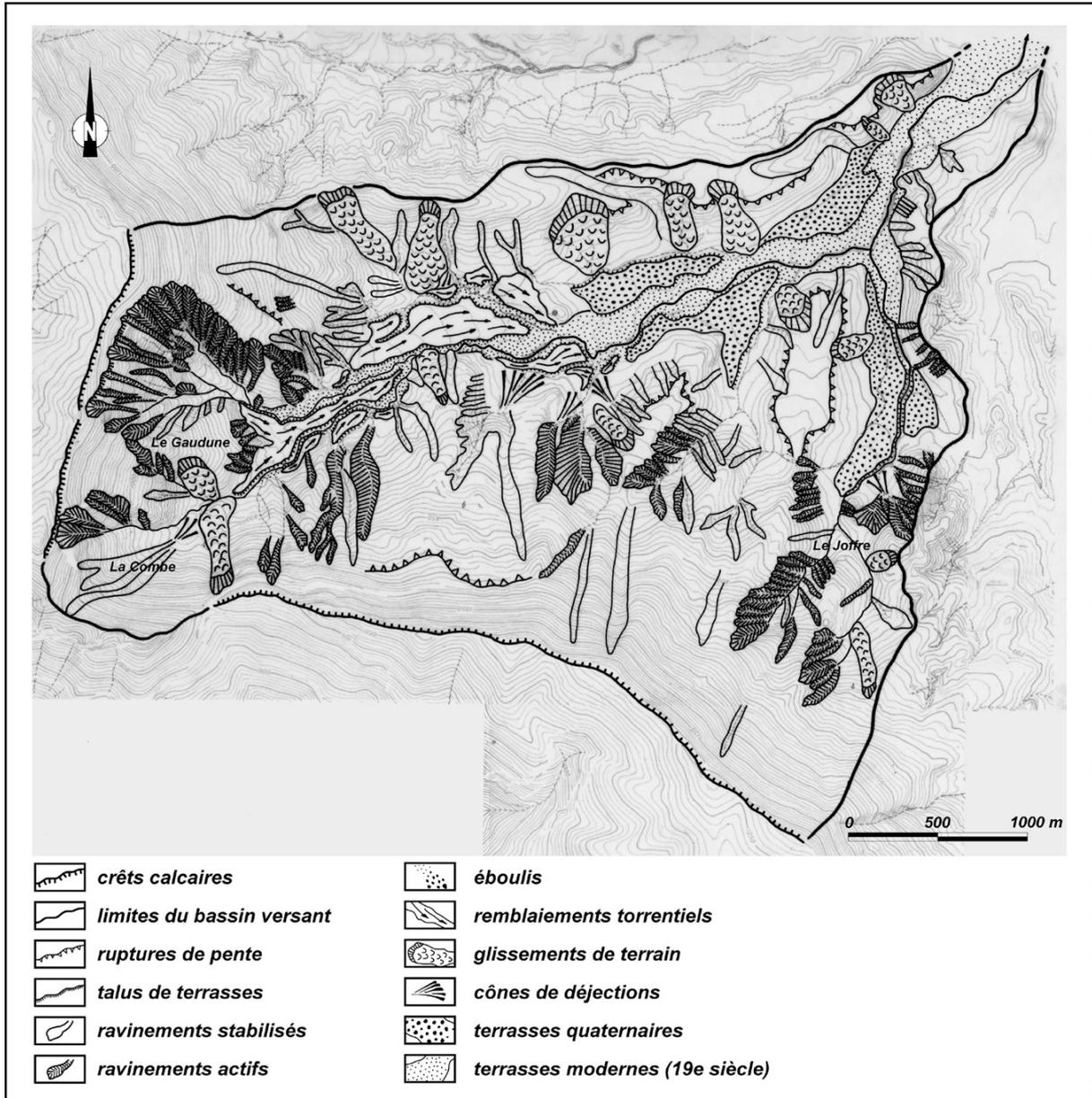
Cartes lithologiques simplifiées des bassins versants de l'Esconavette, de la Barnavette et de la Béoux, réalisées d'après les cartes géologiques au 1/50 000<sup>ème</sup> de Luc-en-Diois, Die et Dieulefit

part et d'autre du ruisseau (Fig. 117). Il faut signaler également une alimentation sans doute anecdotique par le Ruisseau de Joffre, dont les têtes de bassin ravinent les marnes et calcaires marneux de l'Oxfordien. La plupart des glissements de terrain observés sont déconnectés et ils ne participent pas à la recharge sédimentaire du cours d'eau. Le bassin de la Béoux se caractérise par deux grandes zones de production : les dérochoirs des Torrents du Mias et de Trescherènes (Fig. 118). Les sédiments sont produits directement depuis la barre rocheuse et ils sont transmis vers l'aval par une série de ravins en pentes fortes. Plusieurs glissements de terrain se sont déclenchés à proximité des torrents ; ils participent également à la recharge en sédiments grossiers. La plupart des formes d'érosion rencontrées dans le bassin du Bourdiolle sont aujourd'hui stabilisées et on peut considérer son transport solide comme négligeable. Ce cours d'eau présente une morphologie en alternances de marches et de cuvettes qui suggère de très faibles fournitures sédimentaires. Il faut enfin signaler la



**Figure 116**  
Carte géomorphologique du bassin versant de l'Esconavette

présence de grands ravinements en rive droite de la Béoux, à proximité de l'exutoire. Ces formes d'érosion sont toujours actives mais elles sont souvent déconnectées. La grande majorité des sédiments se dépose en pied de versant, formant ainsi un enchevêtrement de grands cônes de déjections qui ont repoussé le cours de la Béoux sur sa rive gauche. Ces sédiments peuvent être parfois réinjectés dans le réseau hydrographique par sapement latéral.



**Figure 117**  
Carte géomorphologique du bassin versant de la Barnavette



**Figure 118**  
 Carte géomorphologique du bassin versant de la Bèoux

### 1.1.2. Contexte hydrologique

Aucun enregistrement hydrologique ou météorologique n'est disponible dans ces trois bassins. Nos différentes observations ainsi que les connaissances régionales nous permettent cependant de présenter quelques éléments. Les précipitations moyennes annuelles enregistrées au niveau des stations météorologiques les plus proches (Die, Luc-en-Diois) sur la période 1965-2002 avoisinent les 900 mm. Ces précipitations se concentrent en automne et au printemps, tandis que les saisons d'été et d'hiver sont moins arrosées. Les crues peuvent se produire à n'importe quelle période de l'année, bien qu'elles soient plus fréquentes en automne et au printemps. De violents orages peuvent se produire en été et occasionner des crues brutales, comme ce fut le cas le 15 juillet 1996 sur l'Esconavette. Ce jour-là, la rivière a provoqué de nombreuses inondations et la route départementale 93 a été coupée pendant plusieurs heures. Les hauteurs de pluie ont été estimées entre 60 et 80 mm d'après les pluviomètres agricoles. L'orage n'avait duré qu'une heure. Du fait de leur nature géologique marquée par l'importance des substrats imperméables (marnes), ces bassins versants se caractérisent par des crues soudaines et violentes pouvant être à l'origine de dégâts importants.

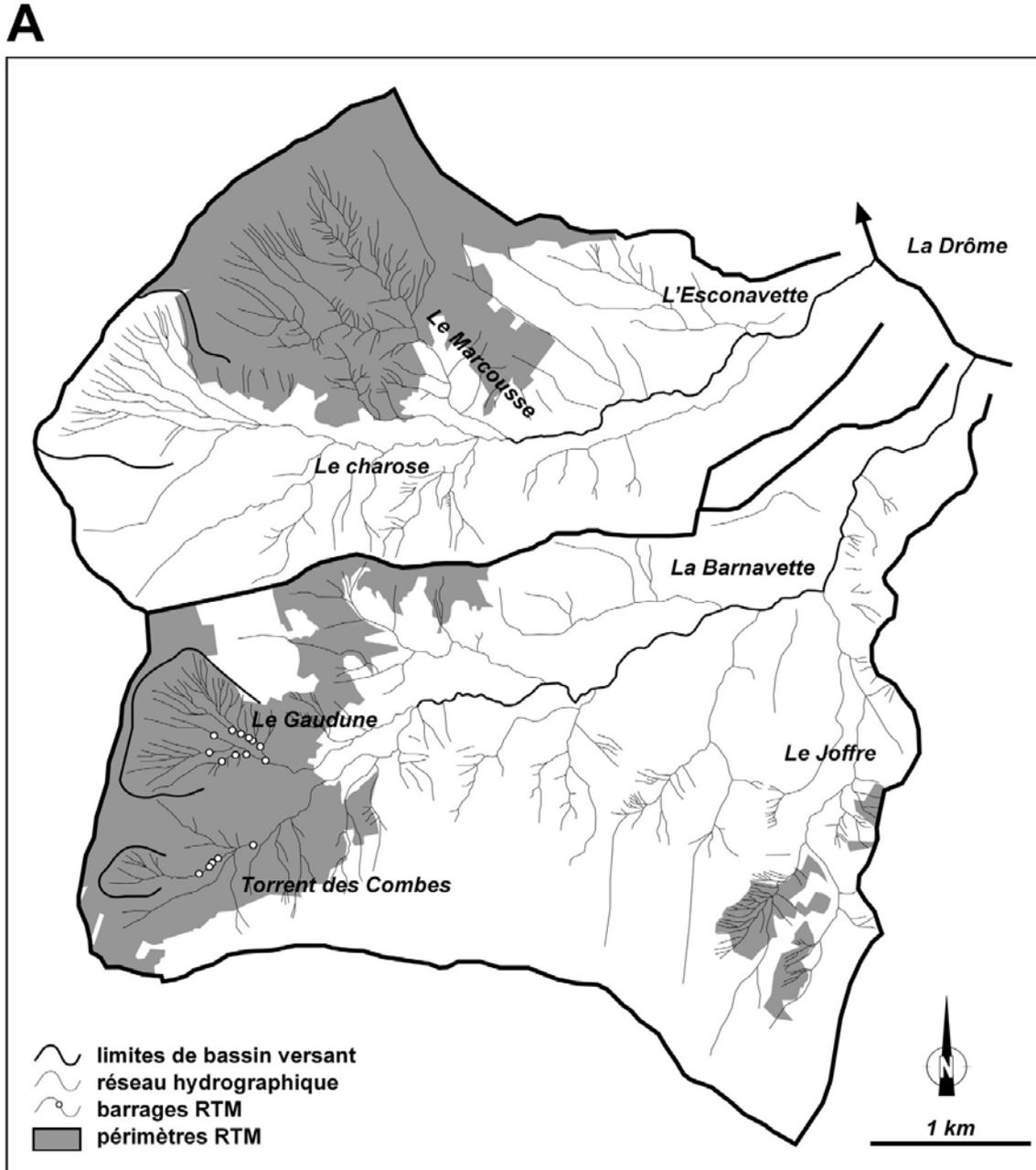
### 1.1.3. Contexte historique

L'histoire contemporaine de ces bassins a été marquée par d'importants travaux de lutte contre l'érosion, effectués au titre de la Restauration des Terrains en Montagne entre 1860 et 1915 (Tab. 35). Le bassin de l'Esconavette correspond à la série RTM de Montmaur-en-Diois, celui de la Barnavette aux séries RTM de Barnave et de Jansac et celui de la Béoux aux séries de Poyols et de Jonchères (Fig. 119 A et B). Les reboisements de protection, constitués principalement de peuplements de pins noirs d'Autriche, occupent aujourd'hui entre 10 et 15% des surfaces drainées. Les autres surfaces boisées, qui représentent environ 60% des bassins, sont composées de futaies de pins sylvestres, de boisements lâches de conifères et de quelques taillis de hêtres [IFN, 1997].

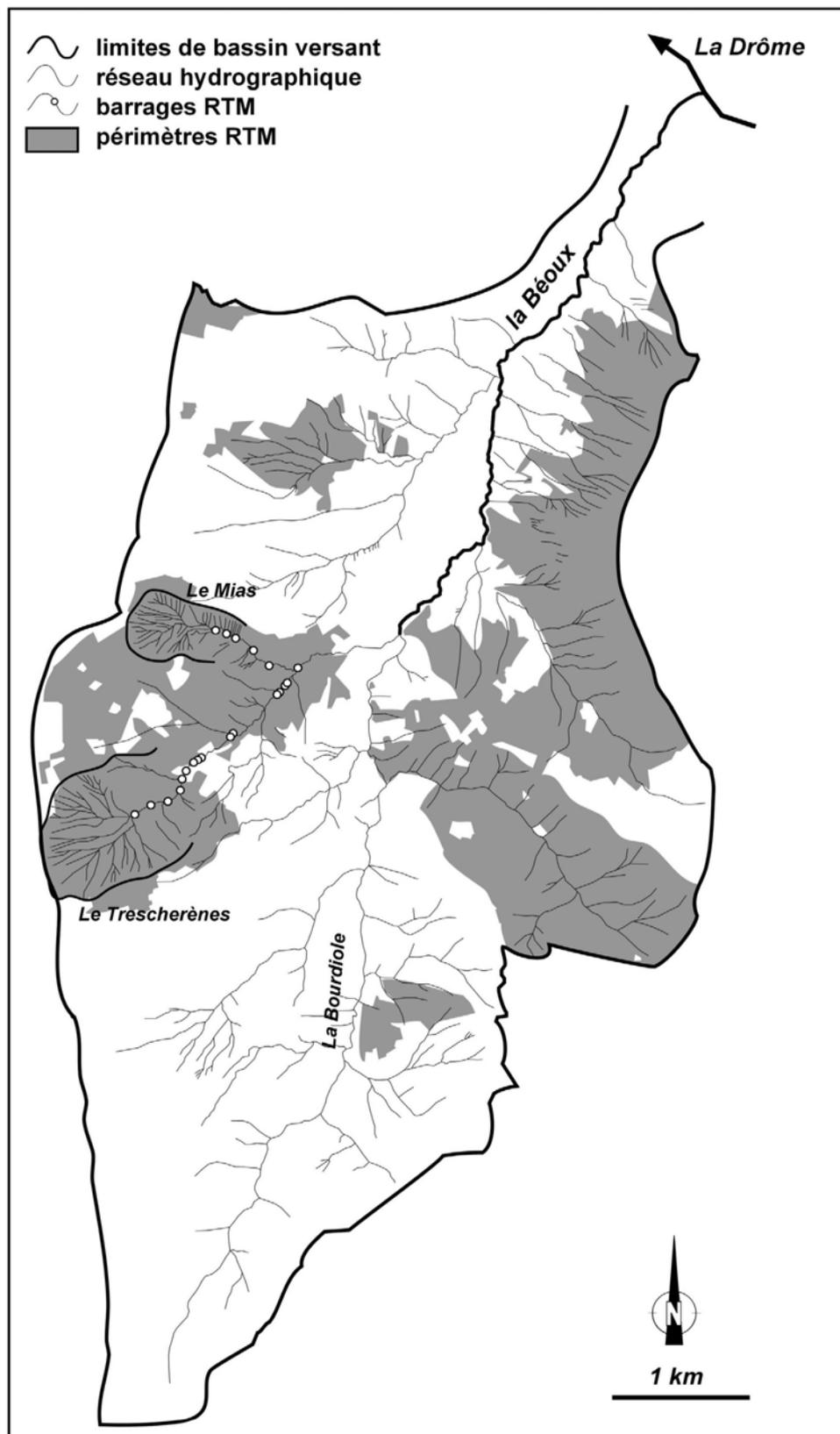
D'importants dispositifs de correction hydraulique ont été mis en place dans les années 1860 et 1870. De nombreux ravins ont été équipés de barrages et de seuils en maçonnerie de pierres sèches, de clayonnages et de fascinages. Ces travaux ont concerné la plupart des branches torrentielles actives, excepté le bassin de réception du Torrent de Charose, principale zone de production sédimentaire du bassin de l'Esconavette. Les reconnaissances de terrain effectuées le long de quelques têtes de bassin autrefois corrigées ont révélé que la plupart de ces ouvrages ont aujourd'hui disparu. On retrouve parfois les assises latérales des barrages qui n'ont pas résisté à l'usure du temps et aux crues successives. L'état actuel du dispositif de correction torrentielle se compose de quelques gros barrages récents dont la plupart ont été construits dans les années 1970 et 1980 (Fig. 119). Il faut signaler sur le Torrent de Trescherènes l'existence d'un ouvrage imposant de 10 mètres de haut, construit en 1965 et rehaussé quelques années plus tard. Cet ouvrage contrôle une grande plage d'atterrissement dont la capacité de stockage est estimée à 40 000 m<sup>3</sup>. Une enquête récente, effectuée par l'ONF de Die, a permis de quantifier les volumes de sédiments stockés derrière ces

Figure 119

Cartes de localisation des périmètres RTM et des ouvrages de correction torrentielle ; A : la Barnavette et l'Esconavette ; B : la Bécoux

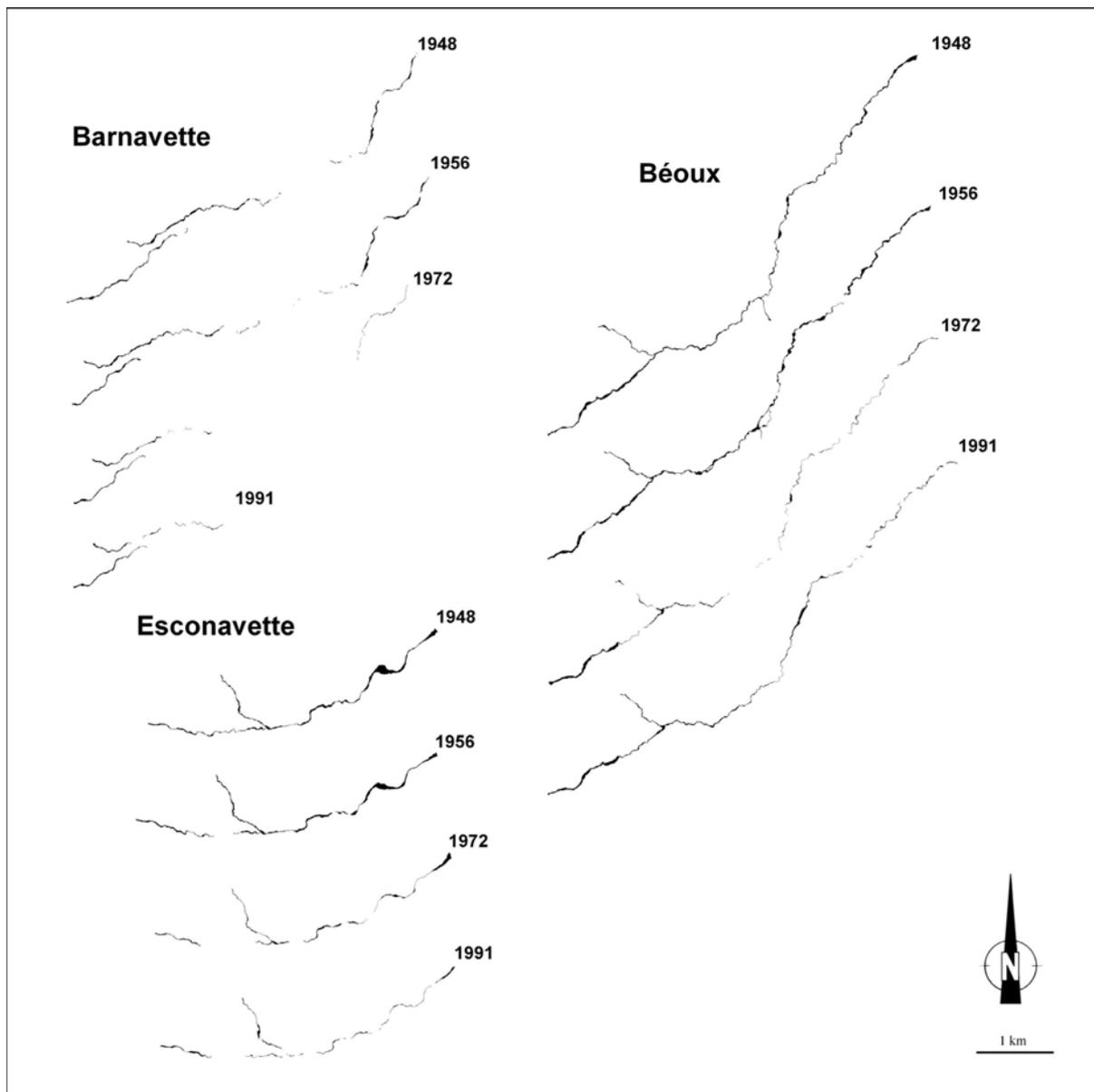


**B**



barrages à partir de relevés géométriques détaillés des ouvrages et du profil en long des tronçons équipés [Liébault et Beullens, 1997]. Ces volumes se chiffrent à 8 500 m<sup>3</sup> sur la Barnavette et à 95 000 m<sup>3</sup> sur la Béoux. Aucun ouvrage n'a été retrouvé dans le bassin de l'Esconavette.

L'évolution récente de ces organismes torrentiels a été marquée par une forte progression spontanée des formations végétales arbustives et forestières liée à la déprise agricole amorcée dans les années 1850 (Tab. 35). Cette reconquête forestière contribue à expliquer une dynamique d'extinction torrentielle attestée par les photographies aériennes de la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle. Les sources sédimentaires se sont stabilisées et les bandes actives se sont rétractées fortement à partir des années 1950 (Fig. 120).



**Figure 120**  
Cartographies diachroniques des bandes actives de l'Esconavette, de la Barnavette et de la Béoux d'après les photographies aériennes de 1948, 1956, 1972 et 1991

## 1.2. Présentation des tronçons de mesure

Un tronçon de suivi de la charge de fond a été sélectionné sur chaque rivière. Ces sites devaient répondre aux exigences suivantes : (1) être positionnés à proximité de l'exutoire afin de bien quantifier les apports de charge de fond à la Drôme ; (2) être caractérisés par la présence de bancs alluvionnaires suffisamment développés pour permettre l'installation du dispositif de suivi ; (3) être situés dans un secteur relativement préservé des perturbations anthropiques de tout genre (curages, extractions sauvages, travaux, vandalisme...).

Le site de mesure mis en place sur l'Esconavette a été positionné à 270 m en amont de la confluence avec la Drôme. Ce secteur est contrôlé par un seuil-gué de 1,8 m de hauteur établi à environ 40 m en amont de la confluence. Le lit se caractérise par un style divaguant, avec un chenal d'étiage qui sinue entre de grands bancs alternés (Fig. 121 A et B). La pente varie entre 0,022 et 0,03 m m<sup>-1</sup>. La bande active présente une largeur moyenne de 20 m et une profondeur moyenne à pleins bords de 2 m. Elle est constituée d'une mosaïque de bancs fins et de bancs grossiers (Fig. 122). Les bancs de graviers fins, dont le D<sub>50</sub> est de 13 mm, sont remaniés plusieurs fois par an. Les bancs grossiers (D<sub>50</sub> de 51 mm) sont mis en place et mobilisés par des crues de fréquence plus faible. Il faut également noter la présence de concentrations de bois mort par endroits.

Sur la Barnavette, le site de mesure a été positionné à 1250 m de la confluence avec la Drôme, au droit d'un tronçon caractérisé par la présence d'atterrissements alluvionnaires (Fig. 121 C). Ce secteur constitue un des rares sites à bancs de graviers observé le long du cours inférieur de ce ruisseau. Le lit entre la confluence avec la Drôme et le site d'étude se caractérise par un tracé relativement rectiligne, un fond plat caillouteux, une bande active dont la largeur moyenne est de 5 mètres et une pente oscillant entre 0,008 et 0,014 m m<sup>-1</sup>. Le tronçon de mesure présente les caractéristiques suivantes : une largeur à pleins bords de 15 mètres, une profondeur moyenne à pleins bords de 1,8 mètres, une pente de 0,012 m m<sup>-1</sup> et un D<sub>50</sub> de 16 mm (Fig. 122). Ce secteur est marqué par une forte instabilité du lit, le chenal d'écoulement principal se déplaçant d'une berge à l'autre après chaque crue importante.

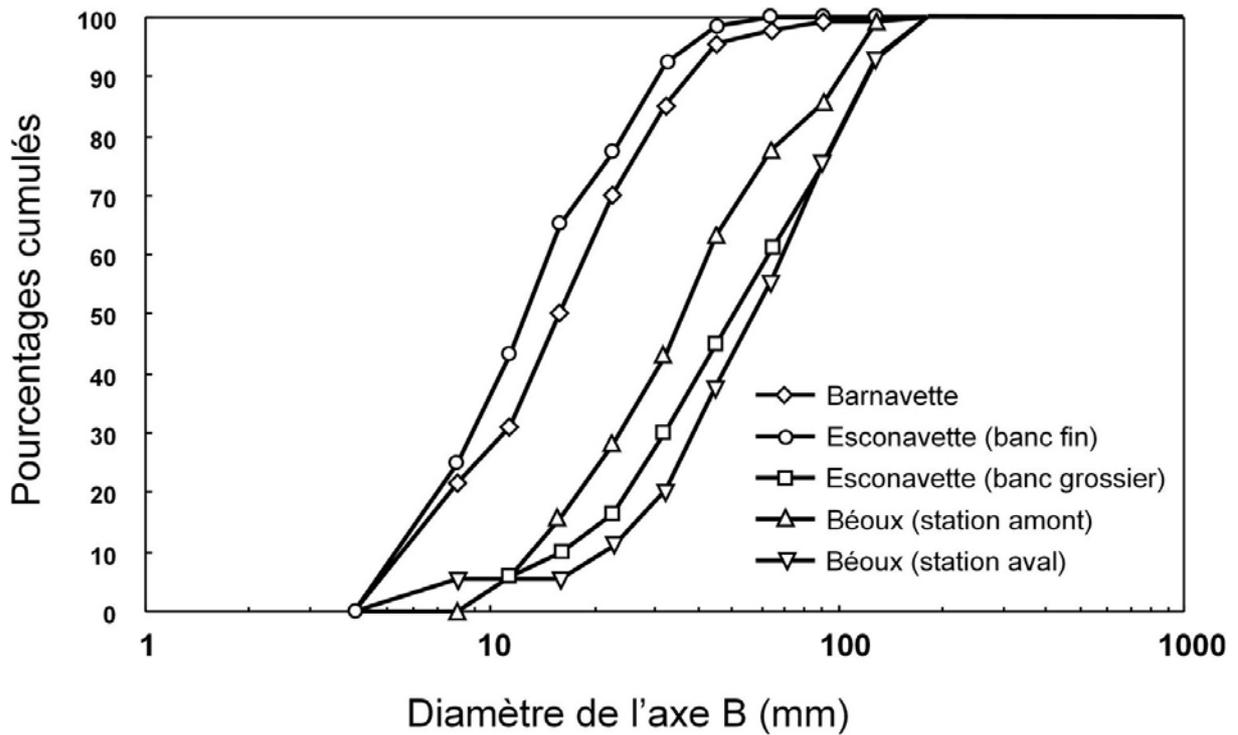
Le lit de la Béoux situé entre la confluence avec la Drôme et le tronçon de mesure (à 500 mètres de l'exutoire) se caractérise par une alternance de secteurs élargis par la formation d'atterrissements et de secteurs plus étroits où la charge doit pouvoir transiter plus facilement. Ces derniers se caractérisent par un lit rectiligne étroit (de l'ordre de 5 mètres) à fond plat caillouteux. Contrairement à la Barnavette, il existe ici une emprise spatiale plus forte des tronçons d'accumulations sédimentaires qui s'organisent sous la forme d'une succession de bancs fins (D<sub>50</sub> proche de 35 mm) et de bancs grossiers (D<sub>50</sub> proche de 60 mm) (Fig. 122). Nous avons installé deux sites de mesure afin d'étudier les remaniements affectant ces deux types bancs. Le premier transect de suivi (T1) est localisé au niveau d'un banc médian constitué de sédiments grossiers (Fig. 121 D et E). Le lit présente ici une largeur de 18 mètres et une profondeur de 0,8 mètres. Ce transect a été établi dans le but de mesurer

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond



**Figure 121**

Les tronçons de suivi de la charge de fond ; A : l'Esconavette vue depuis l'amont (cliché F.L., janvier 1997) ; B : vue aérienne de l'Esconavette à l'aval du transect de mesure (cliché réalisé par Rodolphe Montagnon à l'aide d'un parapente motorisé, 22/07/2001, échelle approximative : 1/800<sup>e</sup>) ; C : la Barnavette vue depuis l'aval (cliché F.L., juillet 1997) ; D : la Béoux vue depuis l'aval, station T1 (cliché F.L., septembre 1998) ; E : la Béoux vue depuis l'amont, station T2 (cliché FL, octobre 1997) ; F : vue aérienne de la Béoux au droit des stations de mesure (cliché réalisé par Rodolphe Montagnon à l'aide d'un parapente motorisé, 22/07/2001, échelle approximative : 1/15 000<sup>e</sup>)



**Figure 122**

*Distributions granulométriques observées sur les sites de suivi de la charge de fond ; échantillonnage surfacique selon le protocole de Wolman [1954]*

l'effet des grosses crues car nous n'observons pas ici de changements significatifs pour les crues dont la récurrence est inférieure à 1 an. Le deuxième profil (T2) est situé sur un tronçon à bancs fins et permet de mesurer l'effet de ces petites crues (Fig. 121 D et F). Le lit présente une largeur de 15 mètres, une profondeur moyenne de 2,5 mètres et une pente de  $0,016 \text{ m m}^{-1}$ . Le fond du lit est constitué d'un banc superficiel dont l'épaisseur est de l'ordre de 50 cm, recouvrant une accumulation grossière qui comporte des blocs et qui peut se trouver temporairement exhumée entre deux crues.

## 2. Le dispositif de suivi

Le dispositif de mesure installé sur chaque rivière se compose d'un ou plusieurs transects de suivi de la charge de fond, d'une station d'enregistrement des hauteurs d'eau et d'un pluviographe (Fig. 114). Nous proposons de détailler ici les techniques et principes de mesure mis en œuvre.

### 2.1. Le suivi de la charge de fond

#### 2.1.1. Principes de mesure

Plusieurs techniques sont aujourd'hui proposées pour mesurer le volume de matériaux grossiers en transit dans le lit des cours d'eau. Elles peuvent se classer en trois grands types :

- les techniques fondées sur l'échantillonnage de la charge en mouvement (pièges à sédiment, échantillonneur de charge de fond) ; le principe est de récupérer les particules qui se déplacent à proximité du fond du lit, soit en immergeant un échantillonneur pendant une certaine période durant l'événement de crue, soit en creusant une fosse dans le lit dont on mesure périodiquement le remplissage après les crues ;
- les techniques fondées sur la mesure des modifications topographiques du lit consécutives à la mise en mouvement des sédiments ; elles permettent d'évaluer indirectement les volumes de matériaux en mouvement à partir de la mesure des formes de creusement et de remblaiement du lit engendrés par le passage d'une onde de crue ;
- les techniques fondées sur le traçage des particules (traçage magnétique ou colorimétrique) ; Il s'agit ici d'évaluer le transport de la charge de fond à partir des distances de transport et des taux de concentration des traceurs après mise en mouvement.

Nous avons appliqué une technique qui associe l'enregistrement des modifications de la section en travers induites par les phénomènes d'érosion et de remblaiement qui se succèdent pendant les crues et la mesure des distances moyennes de transport. Cette technique a été mise au point et expérimentée sur des rivières de petite et moyenne taille, à charge graveleuse [Laronne *et al.*, 1992]. Elle est fondée sur l'équation théorique de continuité du transport de la charge de fond :

$$Q_b = A_b U_b$$

avec,  $Q_b$  : flux de charge de fond de la crue (en  $m^3 s^{-1}$ )

$A_b$  : section solide mobilisée (en  $m^2$ )

$U_b$  : vitesse moyenne des particules pendant la crue (en  $m s^{-1}$ )

La vitesse moyenne des particules qui se déplacent pendant la crue (vitesse virtuelle) peut se calculer de la façon suivante :

$$U_b = \frac{D_b}{t}$$

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

avec,  $Db$  : distance moyenne parcourue (m)

$t$  : durée du transport de la charge de fond (s)

Le volume total de charge de fond en mouvement pour un événement hydrologique donné se calcule ainsi :

$$V_b = Q_b t$$

avec  $V_b$  : volume de charge de fond transporté pendant la crue ( $m^3$ )

La combinaison des trois équations précédentes conduit à la simplification suivante :

$$V_b = \frac{A_b D_b t}{t} \text{ soit } V_b = A_b D_b$$

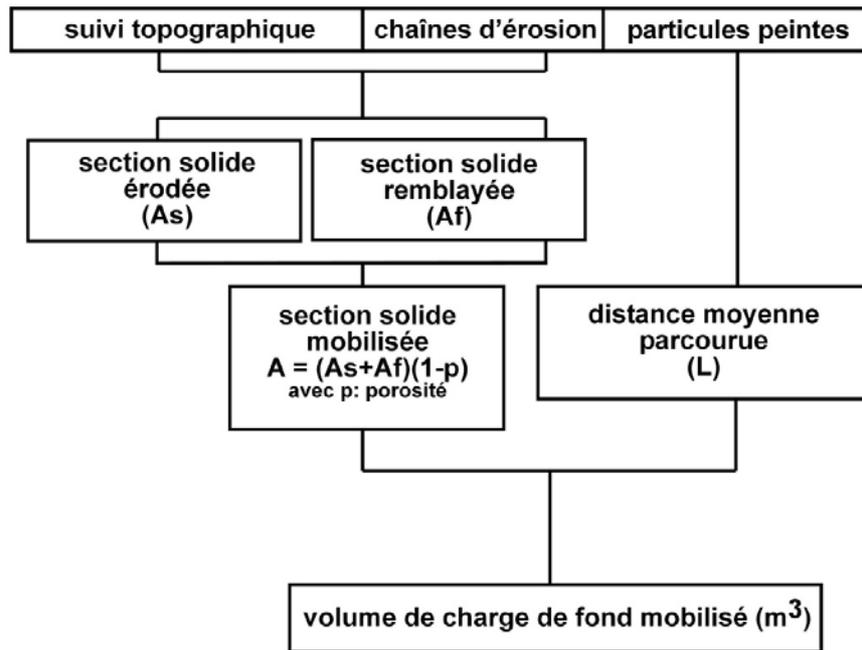
Il est donc possible de connaître le volume de charge de fond transporté lors d'une crue à partir de la section solide mobilisée et de la distance moyenne de transport (Fig. 123).

La section solide mobilisée ( $A_b$ ) se mesure à l'aide de chaînes d'érosion insérées dans le lit [Leopold *et al.*, 1966 ; Nawa et Frissell, 1993 ; Laronne *et al.*, 1994]. Ces chaînes permettent d'enregistrer certaines des phases de remblaiement et de creusement qui se produisent pendant la crue (Fig. 124). Comme tout dispositif de terrain, elles présentent des limites. Elles n'indiquent au plus qu'une seule succession de creusement-remblaiement. Or, il arrive parfois que plusieurs épisodes se succèdent pendant l'événement [Jackson et Beschta, 1982]. Lorsque c'est le cas, les chaînes vont enregistrer la phase de creusement maximale et le remblaiement final, qui peut d'ailleurs être incomplet si la crue s'est terminée par une phase de creusement. Les chaînes fournissent donc une évaluation minimale des volumes en transit. Elles procurent néanmoins une information supplémentaire par rapport à un simple suivi topographique qui ne donne que le résultat final des phases de creusement et de remblaiement. Celles-ci peuvent par ailleurs s'équilibrer à l'issue d'un événement. Dans ce cas, les variations topographiques seront nulles et le suivi altitudinal ne donnera aucune information.

La distance moyenne parcourue par la charge transportée ( $D_b$ ) est obtenue par traçage des particules. Les alluvions potentiellement mobilisables ont été peintes par parcelles de  $1 \text{ m}^2$ . Lorsqu'elles ont été mises en mouvement, elles doivent être localisées et la distance parcourue ainsi que le diamètre de l'axe B sont alors mesurés. Les parcelles sont peintes, dans la mesure du possible, sur les bancs équipés de chaînes.

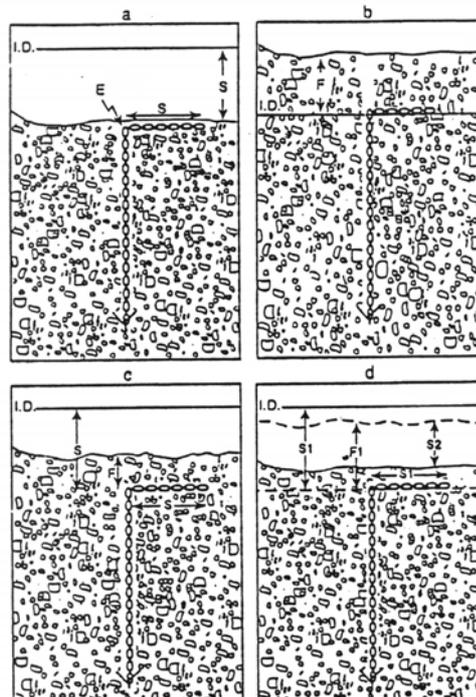
Cette technique a été choisie pour différentes raisons : (1) contrairement à d'autres techniques, elle ne nécessite pas d'être présent pendant la crue pour effectuer les mesures; (2) elle est relativement simple et peu coûteuse ; (3) elle s'adapte bien à nos sites d'étude caractérisés par de longues périodes de basses eaux pendant lesquelles la majeure partie de la bande active est émergée.

Cet équipement léger à mettre en place demande un suivi régulier après chaque crue pour assurer la bonne qualité des mesures. L'ensemble du dispositif doit être repositionné conformément à la nou-



**Figure 123**

Méthode d'évaluation du volume de charge de fond transporté lors d'un événement de crue inspirée de Laronne et al. [1992]



**Figure 124**

Principe de mesure des chaînes d'érosion [d'après Laronne et al., 1994] ; a : érosion du lit sur une épaisseur  $S$  à partir du niveau initial  $ID$ ;  $S$  est égal à la longueur de chaîne horizontale, couchée sur le fond du lit ; b : remblaiement du lit sur une épaisseur  $F$  à partir d'un niveau de base issu d'un épisode de creusement antérieur ; c : érosion du lit sur une épaisseur  $S$  suivie d'un remblaiement sur une épaisseur  $F$ ; l'évolution du niveau topographique après passage de la crue est donc égal à  $S-F$  ; d : érosion initiale sur une épaisseur  $S1$  suivie d'un remblaiement sur une épaisseur  $F1$ , érosion finale sur une épaisseur  $S2$ ; la chaîne ne permet pas dans ce cas de suivre fidèlement la succession des épisodes de creusement et de remblaiement

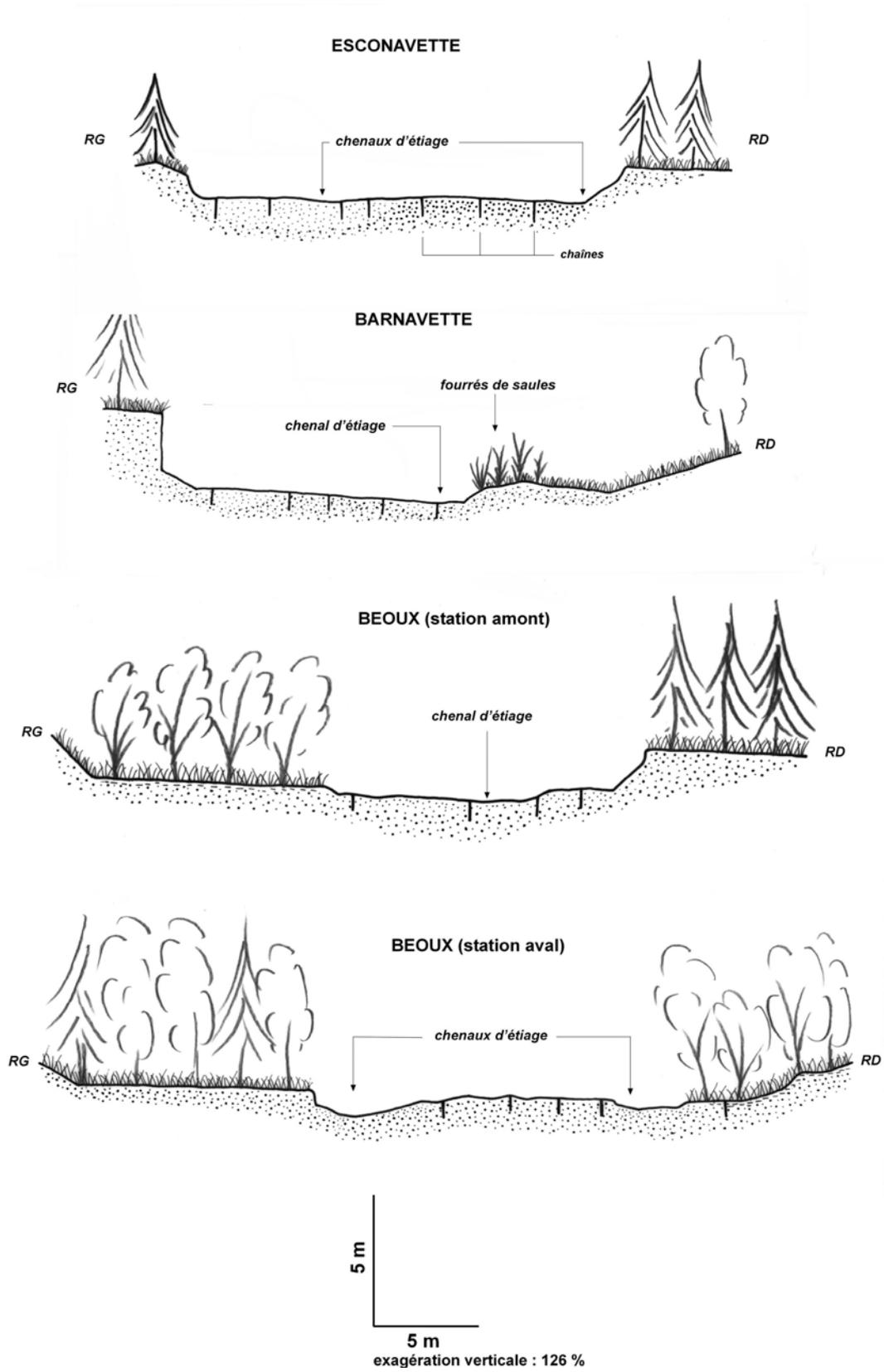
velle disposition topographique du lit après crue. La mesure est effectuée sur chaque station par une équipe de deux personnes et demande une demi-journée de terrain lorsque les conditions de travail sont optimales.

### 2.1.2. Le dispositif de mesure

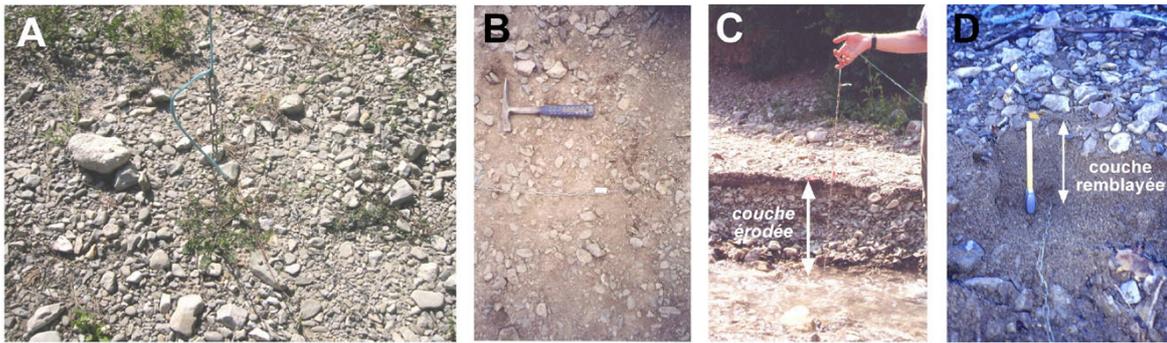
Les stations installées sur les 3 cours d'eau se composent (1) d'un profil en travers mesuré après chaque crue, (2) d'une série de chaînes en acier galvanisé installées à intervalles réguliers de 2 mètres le long du profil et (3) de parcelles peintes de 1 m<sup>2</sup> positionnées sur les bancs de graviers (Fig. 125). Dans la mesure du possible, la longueur de chaîne insérée verticalement dans le fond du lit a été fixée à 1 mètre afin d'assurer un bon ancrage. Nous avons laissé également une longueur de 50 cm posée sur le fond du lit. Chaque chaîne est repérée par une ficelle de plusieurs mètres de long attachée à son extrémité afin de faciliter sa localisation après la crue. Nous avons utilisé des chaînes de diamètre de maille égal à 2 cm, valeur proche du diamètre moyen des particules présentes en surface (Fig. 126). La technique d'insertion utilisée présente l'avantage de ne pas perturber la structure sédimentaire lors de l'installation (Fig. 127).

La mesure des distances de transport a été réalisée à partir de parcelles peintes de 1 m<sup>2</sup> positionnées sur les différentes unités sédimentaires des sites (Fig. 128). Nous avons peint généralement une parcelle sur banc fin et une parcelle sur banc grossier afin de prendre en compte la diversité granulométrique des tronçons. Lorsque une crue mobilisatrice s'est produite, le relevé consiste à parcourir le tronçon de rivière situé en aval sur une distance de 500 mètres et à mesurer le diamètre de l'axe B et la distance parcourue de chaque particule retrouvée. Ce travail de localisation a été effectué systématiquement sous la forme d'un aller-retour de façon à retrouver le maximum de traceurs. Les parcelles ont été repeintes après chaque crue en utilisant une couleur différente afin d'éviter les confusions avec les événements précédents. Cette technique permet d'attribuer une distance moyenne de transport à chaque crue mobilisatrice. Le traçage colorimétrique a été préféré au traçage magnétique car il est plus facile à mettre en oeuvre. Le traçage magnétique présente l'avantage de permettre la détection des particules enterrées, ce qui augmente significativement le pourcentage de traceurs retrouvés [Hassan *et al.*, 1984 ; Schmidt et Ergenzinger, 1992]. Néanmoins, cette technique ne permet pas de suivre les particules dont le diamètre est trop petit pour permettre l'insertion d'un aimant. Elle risque donc de sous estimer les distances moyennes de transport. D'autre part, elle présente l'inconvénient de perturber les structures sédimentaires car le marquage ne peut se faire in situ. Les particules doivent être prélevées, perforées pour placer un aimant et repositionnées dans le lit. Il faut enfin souligner que cette approche implique des opérations post-crue qui sont longues et fastidieuses, nécessitant l'utilisation d'un détecteur magnétique pour localiser chaque particule. Compte tenu du caractère événementiel des mesures et du fait que les crues se produisent souvent à des intervalles de temps rapprochés, il était impératif de privilégier une approche facile à mettre en oeuvre et permettant des relevés rapides. L'utilisation de la peinture répondait mieux à ces objectifs.

Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

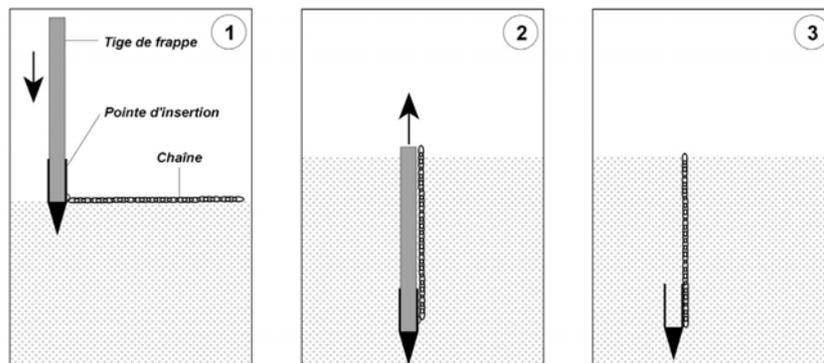


**Figure 125**  
Présentation des transects de suivi de la charge de fond mis en place sur l'Esconavette, la Barnavette et la BéoUX



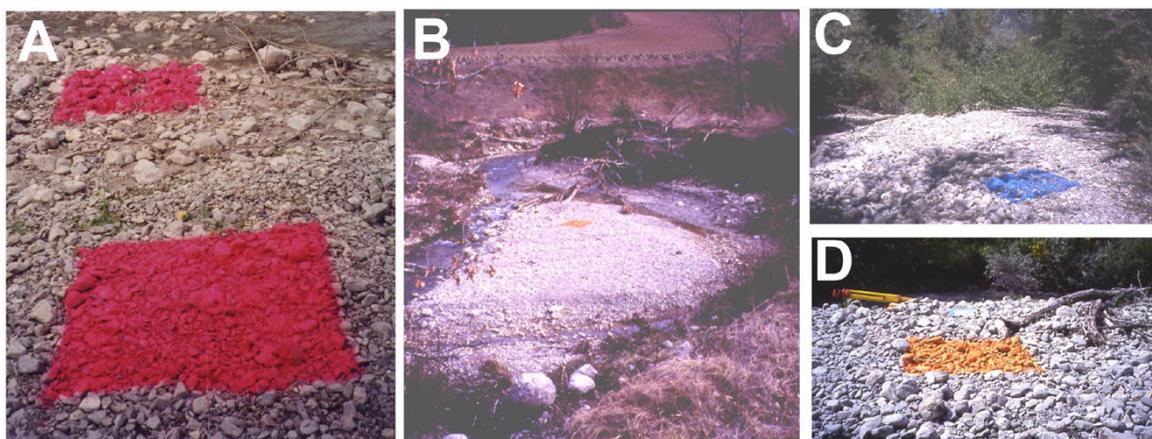
**Figure 126**

Exemples de chaînes d'érosion implantées sur les sites de suivi de la charge de fond; A : Esconavette (cliché Philippe Belleudy) ; B : Esconavette (cliché F.L.) ; C : position de la chaîne après une crue qui s'est terminée par une phase d'érosion (Esconavette, cliché F.L.) ; D : position de la chaîne après une crue qui s'est terminée par une phase de remblaiement (Barnavette, cliché F.L.)



**Figure 127**

Technique d'insertion des chaînes inspirée de Laronne et al. [1994] ; 1 : la chaîne est attachée à une pointe d'insertion dans laquelle s'emboîte une tige de frappe ; l'ensemble du dispositif est inséré dans le banc de graviers manuellement à l'aide d'une masse ; 2 : une fois la chaîne insérée selon la profondeur désirée, on retire la tige de frappe ; 3 : la chaîne est ancrée dans les sédiments par la pointe d'insertion



**Figure 128**

Exemples de parcelles peintes pour le suivi des distances de transport de la charge de fond ; A : parcelles sur banc fin et banc grossier (Barnavette) ; B : parcelle sur banc fin (Barnavette) ; C et D : parcelles sur bancs grossiers (Béoux site aval) (clichés F.L.)

Sur l'Esconavette, nous avons inséré 7 chaînes, dont 4 ont été installées sur un banc de graviers fins localisé à proximité du chenal d'étiage principal et 3 sur un banc grossier remobilisé uniquement lors des fortes crues. Une parcelle peinte a été positionnée sur chaque banc. Le transect établi sur la Barnavette a été équipé de 5 chaînes permettant de mesurer les changements topographiques qui se produisent au droit d'une zone d'accumulation constituée d'un assemblage de bancs fins et de bancs grossiers. Ce site comprend également 2 parcelles peintes positionnées en fonction de la granulométrie des bancs. Sur la Béoux, il n'a pas été possible d'utiliser un seul transect permettant de suivre à la fois les bancs fins et grossiers, ce qui explique l'installation de deux sites de suivi. La station amont est installée au niveau d'une zone d'accumulation fine recouvrant un banc plus grossier, généralement stable. Le dispositif se compose de 4 chaînes ancrées dans le banc grossier qui permettent de mesurer les variations topographiques affectant la nappe de recouvrement. La station aval a été positionnée sur un banc grossier équipé de 5 chaînes. Chacune de ces deux stations est également équipée d'une parcelle peinte.

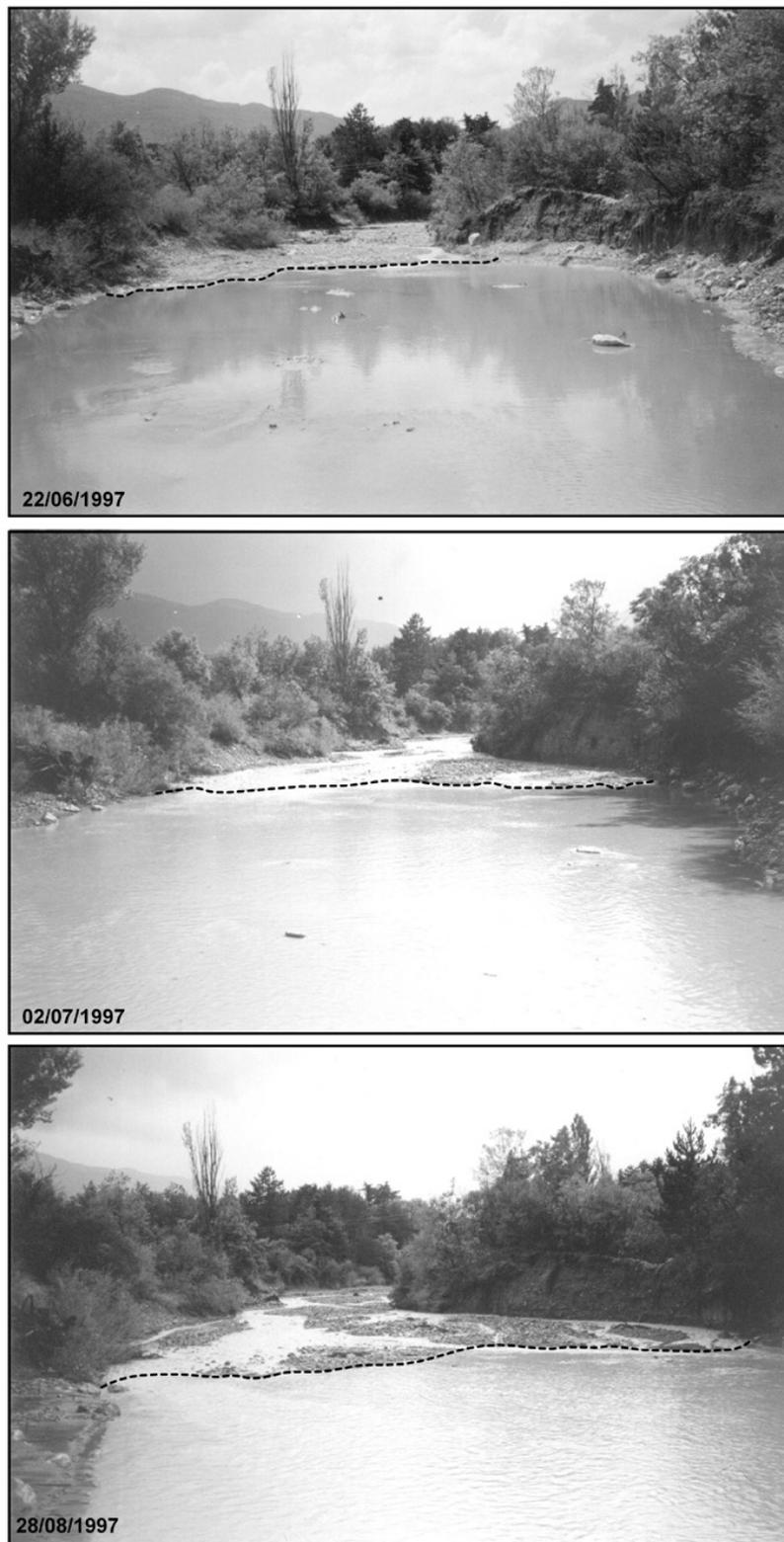
#### 2.1.3. Évaluation de la précision des mesures

La précision des mesures volumétriques du transport de la charge de fond a pu être appréciée à partir d'une comparaison des résultats de transport solide obtenus en 1997 sur l'Esconavette avec le remplissage d'une fosse d'extraction sauvage localisée à l'aval de la station de mesure. Cette fosse, d'une capacité initiale de 300 m<sup>3</sup>, a été progressivement comblée par les apports successifs de 5 crues, survenues entre le 16 mai et le 6 novembre 1997 (Fig. 129). Nous avons effectué un suivi du comblement à partir de 4 profils en travers positionnés le long de la fosse selon un intervalle de 20 mètres. A l'issue de la crue de 6 novembre, le niveau de gravier avait atteint le niveau du lit avant extraction sur les 3 profils amont, tandis que le remplissage était encore incomplet sur le dernier profil (Fig. 130). Nous avons donc considéré que la totalité du charriage effectif entre le 16/05 et le 06/11 a été piégée dans la fosse. Un levé topographique de la fosse après la crue du 16 mai nous a permis de mesurer le remblaiement effectué après cet événement qui s'est produit avant l'installation des chaînes et des parcelles peintes. Ce dispositif a été installé le 4 juin 1997. Nous avons donc effectué une comparaison des volumes charriés sur la base des 4 crues survenues entre le 22/06 et le 06/11/1997. Les résultats obtenus sont les suivants (ces résultats prennent en compte la porosité du sédiment) :

- cumul du charriage mesuré à partir des chaînes d'érosion et des distances de transport entre le 22/06/97 et le 06/11/97 : 217 m<sup>3</sup> (Tab. 43)
- volume de charge de fond déposé dans la fosse entre le 22/06/97 et le 06/11/97 : 192 m<sup>3</sup>

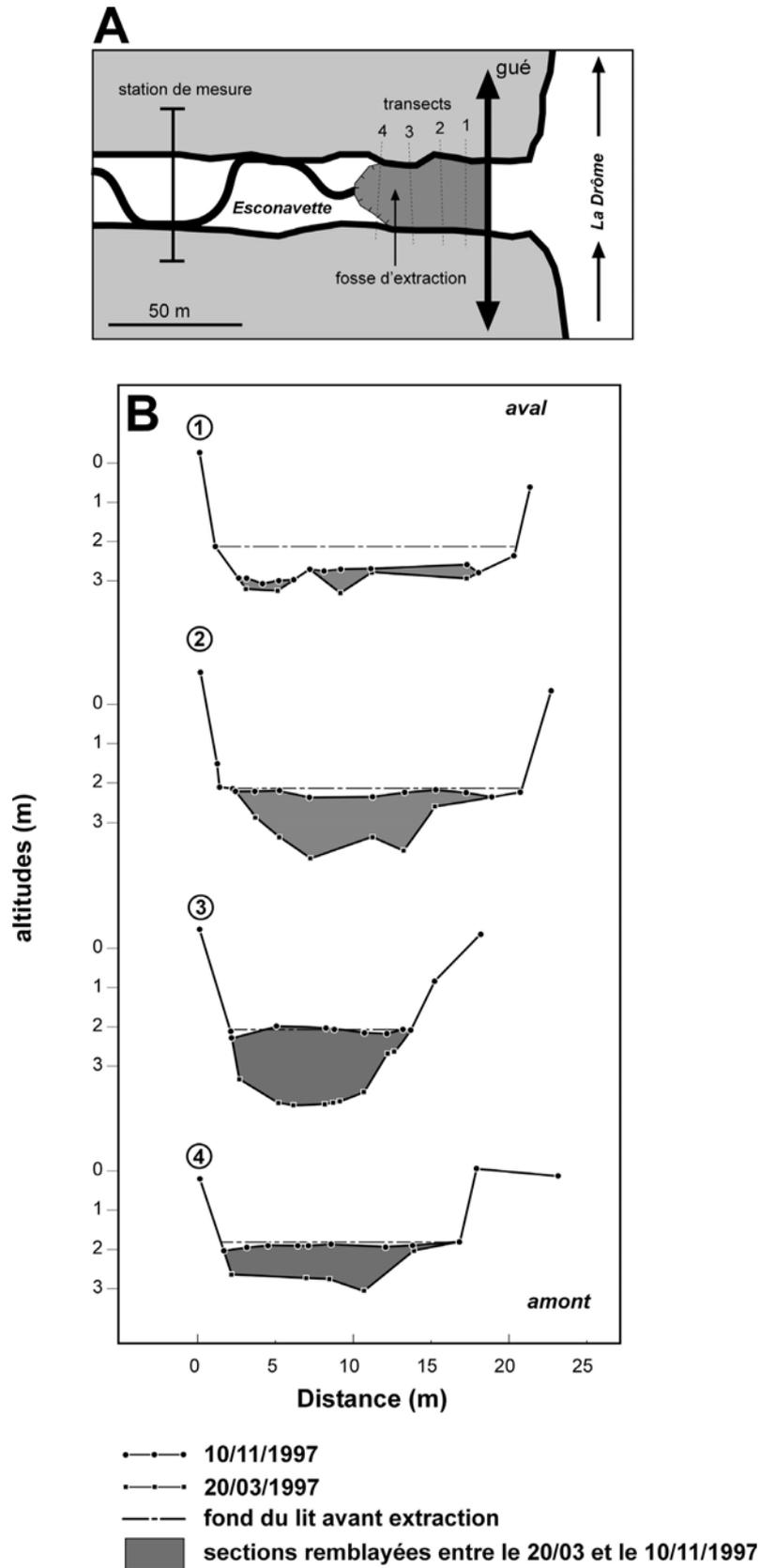
La différence entre les 2 volumes est de 25 m<sup>3</sup>. La technique de mesure mise en œuvre conduit à une surestimation de 13 % du volume de charge de fond transporté. Cette marge d'erreur est acceptable compte tenu des résolutions généralement observées lorsqu'il s'agit de calculer le transport solide à partir d'une approche morphologique. Carson et Griffiths [1989] obtiennent des différences de

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond



**Figure 129**

*Nappes de graviers progradantes qui ont contribué au comblement progressif d'une fosse d'extraction sauvage établie en aval du site de suivi de la charge de fond sur l'Esconavette ; le remplissage de la fosse a fait l'objet d'un suivi topographique dont l'objectif fut d'évaluer la précision des volumes de charge de fond mesurés à par-*



**Figure 130**

Suivi topographique du remplissage de la fosse d'extraction établie sur l'Esconavette ; A : croquis de localisation ; B : profils en travers diachroniques

l'ordre de 15% entre des estimations fondées sur les changements morphologiques survenus pendant une année le long d'une grande rivière en tresses et les calculs de transport solide fondés sur l'équation de Meyer-Peter et Muller. Martin et Church [1995] obtiennent également une marge d'erreur de 15% sur une grande rivière graveleuse dont le charriage a été estimé pour une période de 9 ans à partir d'un suivi de profils en travers. Des résultats similaires ont été obtenus sur la rivière Fraser où le transport de la charge de fond a été établi à partir d'un suivi topographique sur une période de 32 ans et calculé par extrapolation des mesures de transport solide sur une courbe des débits classés pour cette même période [Mc Lean et Church, 1999]. La différence entre les 2 estimations se chiffre à 20%. Ham et Church [2000] ont calculé une imprécision de 18% sur la rivière Chiliwack en Colombie Britannique, dont la charge de fond a été estimée à partir des changements morphologiques détectables sur les séries de photographies aériennes couvrant une période de 39 ans.

## **2.2. Le suivi hydrologique des crues**

Conjointement au suivi de la charge de fond, nous avons installé en juillet 1999 des dispositifs qui permettent de mesurer certaines caractéristiques hydrologiques des crues qui ont entraîné une mobilisation du sédiment. Nous disposons d'une station hydrologique sur chacun des trois cours d'eau. Ces stations ont été positionnées à proximité des sites de suivi de la charge de fond (Fig. 114). Elles se situent donc à l'aval des bassins versants et elles intègrent l'ensemble des superficies drainées. L'équipement installé permet un enregistrement continu des hauteurs d'eau.

### *2.2.1. Les sites de mesure*

L'installation de stations hydrométriques doit répondre à un certain nombre d'exigences afin d'assurer la bonne qualité des mesures [Réménéras, 1976]. La mise en place d'un dispositif d'enregistrement des hauteurs d'eau doit se faire au droit d'une section stable. Il convient donc de choisir un tronçon contrôlé latéralement et dont le fond du lit est fixé. Les sections situées sous les ponts offrent généralement de bonnes conditions de contrôle et sont souvent utilisées pour ce genre de mesure. Un autre impératif nécessaire au bon fonctionnement de la station est l'uniformité morphologique du tronçon de mesure. Celui-ci doit être le plus rectiligne possible, présenter une pente, une géométrie et une granulométrie homogène sur une longueur correspondant à 4 ou 5 fois la largeur du lit à l'amont de la section de contrôle et deux fois la largeur du lit à l'aval de la section. Ces recommandations visent notamment à se prémunir contre les écoulements trop turbulents, difficiles à modéliser d'un point de vue hydraulique.

Sur l'Esconavette, nous avons installé le dispositif sous le pont de la route départementale 93. Le fond du lit est contrôlé par un seuil en maçonnerie de pierres sèches de 1 mètre de hauteur localisé à une dizaine de mètres en aval de la station. La section est également contrôlée latéralement par les piles du pont (Fig. 131). Le lit présente des conditions d'écoulement homogènes sur une distance de 90 mètres, ce qui représente 12 fois la largeur du lit au niveau de la section de mesure. La pente

est de  $0,023 \text{ m m}^{-1}$ . Le dispositif de mesure a été fixé sur la pile du pont localisée en rive droite. Le fond du lit est constitué d'alluvions dont le  $D_{50}$  est de 26 mm. La contenance hydraulique maximale de la section est estimée à  $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

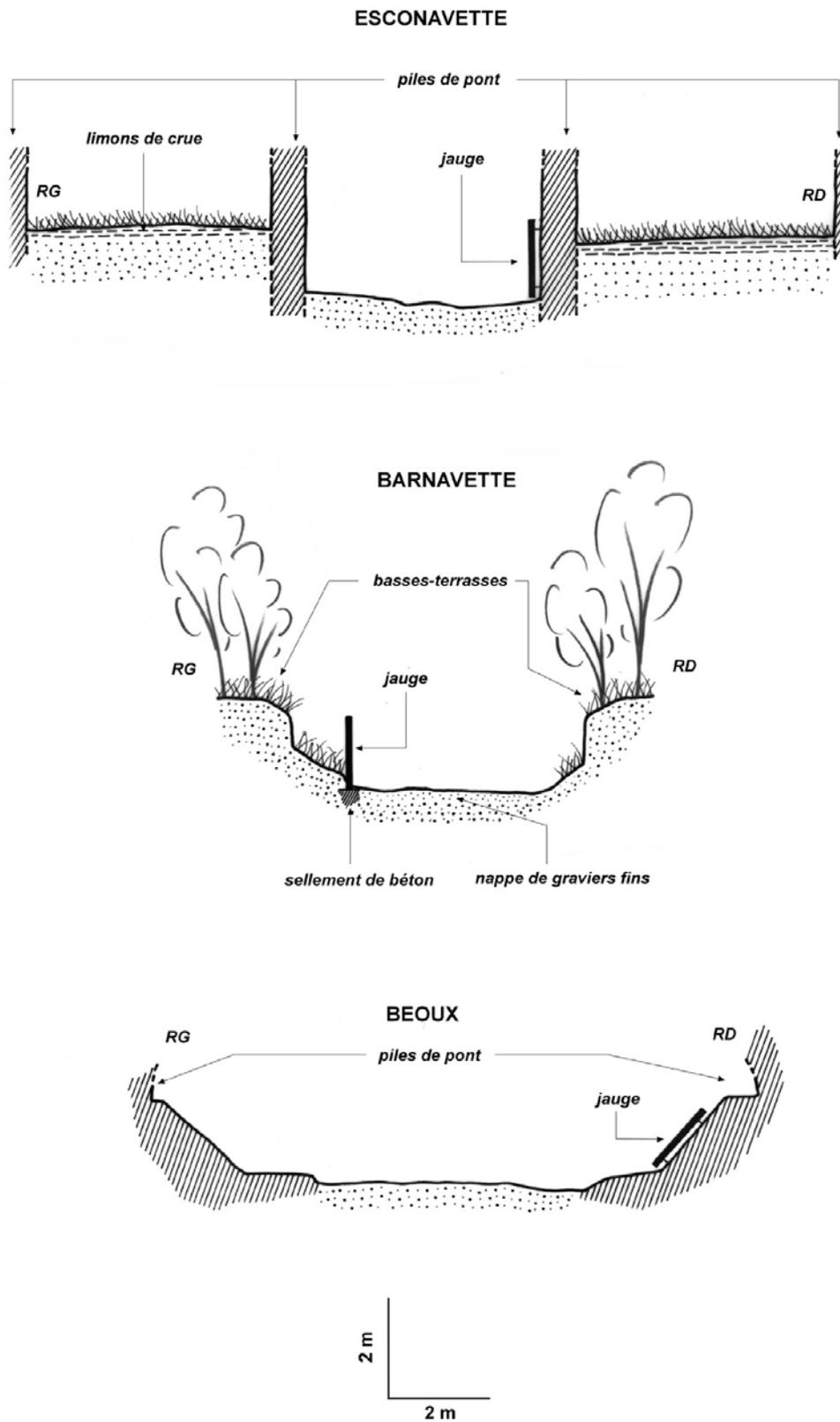
Sur la Barnavette, la station hydrométrique a été installée au niveau d'un tronçon naturel dont le fond du lit est contrôlé par un embâcle de débris ligneux grossiers localisé à une centaine de mètres en aval. Ce barrage naturel est resté en place durant toute la période d'observation. Il a été enlevé récemment par les services ayant en charge l'entretien des cours d'eau. Les berges sont bien maintenues par des boisements de peupliers et d'aulnes à racines plongeantes. Ce tronçon présente un tracé rectiligne et des caractéristiques morpho-sédimentaires homogènes sur une distance de 45 mètres, correspondant à 6 fois la largeur moyenne du lit. La pente est de  $0,013 \text{ m m}^{-1}$ . Le fond du lit est constitué de nappes caillouteuses discontinues ( $D_{50} = 21 \text{ mm}$ ) reposant sur un plancher alluvial plus grossier. Le dispositif a été installé en rive gauche, au pied de la berge (Fig. 131). La contenance de la section d'écoulement a été estimée à  $26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Sur la Béoux, le dispositif a été mis en place sous le pont de la départementale 93. Ce site présente l'avantage de fournir une section trapézoïdale bétonnée, de forme géométrique simple (Fig. 131). Le fond du lit est contrôlé par un seuil-radier en enrochement construit récemment et situé à une dizaine de mètres en aval de la section. Le tronçon est homogène sur une longueur de 12 mètres, soit 1,5 fois la largeur de la section équipée. Cette valeur est faible au regard des exigences hydrauliques recommandées. Néanmoins, ce site présente l'avantage de fournir une section géométrique simple et stable, qui peut être assimilée à un chenal artificiel homogène. Ces conditions locales peuvent pallier aux exigences d'uniformité de l'écoulement sur de grandes distances. La pente présente une valeur de  $0,018 \text{ m m}^{-1}$ . La capacité d'écoulement de la section a été estimée à  $80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

### 2.2.2. Le dispositif de mesure

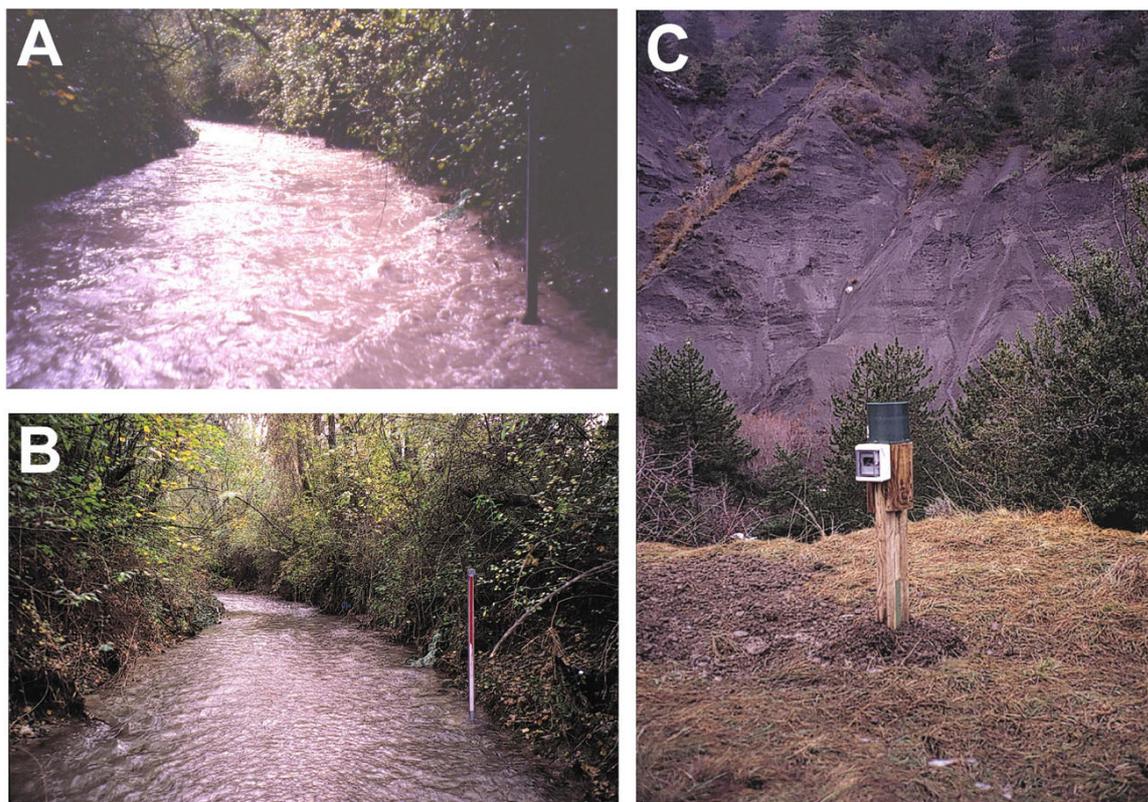
Le dispositif de mesure hydrologique se compose d'une sonde d'enregistrement en continu des hauteurs d'eau et d'une échelle à maximum permettant à la fois de contrôler les données enregistrées par la sonde et de pallier à un éventuel dysfonctionnement de l'enregistrement. L'échelle à maximum est constituée d'un ruban adhésif coloré qui devient transparent au contact de l'eau. Ce système permet d'enregistrer la hauteur d'eau maximale atteinte durant un épisode de crue (Fig. 132A et B).

Le dispositif d'enregistrement des hauteurs d'eau (sonde *D-Diver*) fonctionne à partir d'un capteur de pression fabriqué et commercialisé par la société *Eijkelkamp*. Il s'agit d'une sonde en acier galvanisé qui comprend un capteur de pression, une batterie interne dont la durée de vie est de 10 ans ainsi qu'une centrale d'acquisition capable de mémoriser jusqu'à 16 000 mesures. La résolution théorique est de 0,5 cm et la hauteur d'eau maximale mesurable est de 5 mètres. Nous avons adopté un pas d'échantillonnage de 10 minutes, ce qui procure une autonomie de 3 mois et 21 jours. La programmation ainsi que la récupération et le traitement des données se font à partir d'un logiciel fourni avec le matériel (*Enviromon*).



**Figure 131**

Présentation des stations hydrométriques installées sur les ruisseaux de l'Esconavette, de la Barnavette et de la Béooux ; les jauges sont composées d'une échelle à maximum et d'une sonde d'enregistrement des hauteurs d'eau à partir de capteurs de pression



**Figure 132**

*Le dispositif de mesure hydrologique et pluviométrique ; A : la Barnavette en crue au droit du tronçon de suivi hydrologique (21/10/1999) ; B : l'échelle à maximum indique le niveau d'eau atteint lors du pic de crue visible sur la photo précédente ; C : pluviographe à auget basculeur installé dans le haut bassin de la Béoux (clichés F. L.)*

Afin de corriger les effets de la pression atmosphérique sur les hauteurs d'eau, nous avons utilisé des sondes de compensation mises hors d'atteinte des crues. Lorsqu'on soustrait ces valeurs à celles obtenues avec les sondes immergées, nous obtenons les hauteurs d'eau. Ces données nous permettent d'établir les hydrogrammes de crue, d'étudier leur forme, de déterminer le nombre de pics et la durée de l'événement (Fig. 133). Toutes ces informations sont utiles pour analyser la variabilité du transport solide observée entre les crues.

Il est apparu à l'usage que ces sondes sous-estimaient les hauteurs d'eau. La comparaison des hauteurs d'eau maximales enregistrées par les capteurs de pression et mesurées à l'aide des échelles à maximum pour un même événement a montré des différences importantes. La moyenne des différences absolues entre les 2 mesures a été de 11,16 cm (valeur obtenue à partir de 51 comparaisons). La qualité des mesures obtenues à partir des échelles à maximum a pu être contrôlée à plusieurs reprises. Nous n'avons donc utilisé les enregistrements automatiques que pour caractériser la forme générale des hydrogrammes (nombre de pics) et la durée approximative des crues.

Des mesures de vitesse d'écoulement de surface ont également été effectuées à l'occasion de certaines crues afin d'estimer les débits. Ces mesures ont été réalisées à l'aide de flotteurs (bois mort)

sur de longues distances (environ 30 mètres) et elles ont été répétées 5 fois afin d'obtenir une moyenne. La vitesse moyenne de l'écoulement sur l'ensemble de la section a été obtenue à partir de la formule suivante :

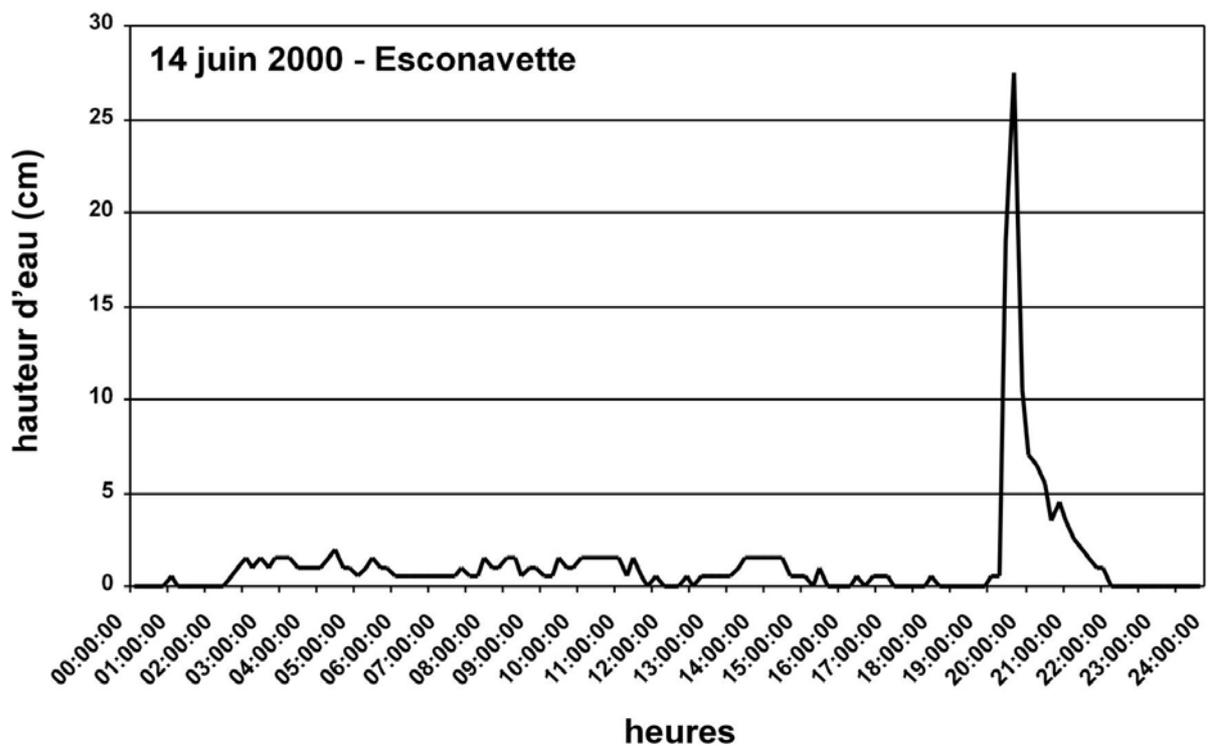
$$V_m = kV_s$$

avec  $V_m$  : vitesse moyenne ( $m\ s^{-1}$ )

$V_s$  : vitesse de surface ( $m\ s^{-1}$ )

$k$  : coefficient dont la valeur dépend du type de flotteur utilisé

La valeur du coefficient  $k$  varie en fonction du rapport entre la profondeur d'exploration du flotteur et la hauteur d'eau. Nous avons adopté une valeur de 0,85 généralement recommandée sur la plupart des cours d'eau [Gordon *et al.*, 1992].



**Figure 133**

Exemple d'hydrogramme de crue obtenu à partir des sondes à capteur de pression ; crue survenue sur l'Esconavette le 14 juin 2000 à l'occasion d'un orage d'été

### 2.3. Le suivi des précipitations

Chaque bassin versant a été équipé d'un pluviographe localisé dans les bassins de réception torrentiels. L'utilisation d'un seul pluviographe par bassin n'a pas permis d'appréhender avec précision la quantité d'eau totale précipitée lors d'un épisode de crue compte tenu de la forte variabilité spatiale des averses. Elle a permis cependant de comparer l'intensité et la quantité des pluies tombées au niveau des principales zones de production sédimentaire des trois bassins. Ces paramètres peuvent potentiellement expliquer d'éventuelles différences en terme de transport solide.

Nous avons installé des pluviographes à auget basculeur dont la résolution est de 0,10 mm et la surface collectrice de 324 cm<sup>2</sup> (modèle *Rainew wireless rain gauge*). Les données sont mémorisées dans une centrale d'acquisition (*Hobo Event datalogger* avec batterie au lithium dont la durée de vie est de 1 an). Les pluviographes ont été installés dans des périmètres dégagés, localisés à proximité d'habitations ou au sein de périmètres de captage de sources clôturés afin d'éviter les problèmes de vandalisme (Fig. 132C).

Ces appareils ont nécessité un entretien régulier afin d'éviter les dysfonctionnements liés à l'accumulations de débris organiques dans le fond du réceptacle (et plus particulièrement ceux amenés par l'avifaune locale). L'enregistrement a été affecté par ce type de problème lors de la première année de mesure. Pour éviter l'incursion des oiseaux sur le pluviographe, nous avons tendu un fil sur son pourtour et ceci s'est avéré efficace.



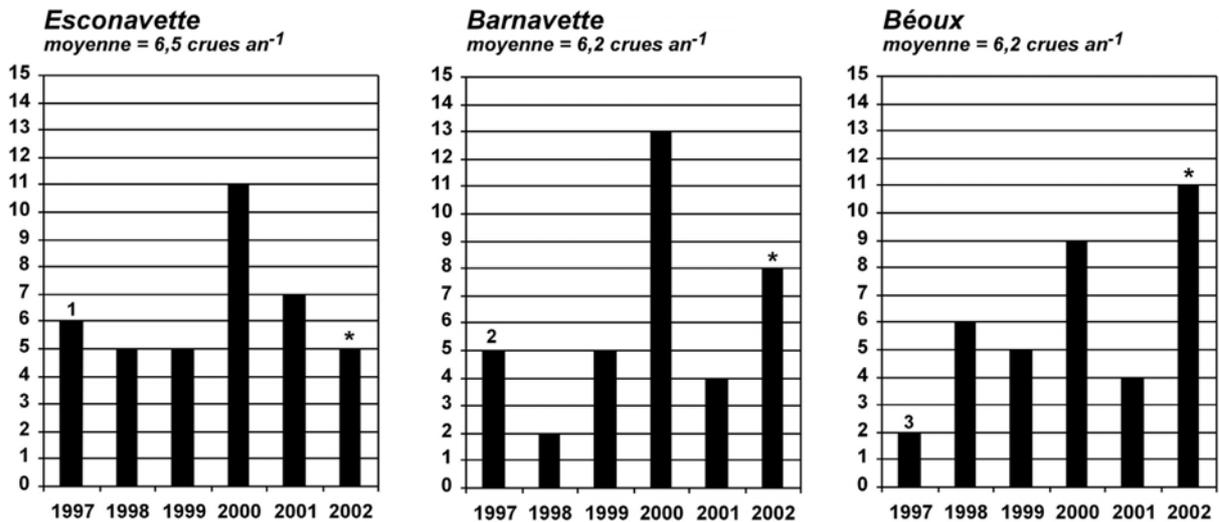
### 3. Les fréquences et seuils de mise en mouvement de la charge de fond

#### 3.1. Fréquences inter-annuelles et occurrence saisonnière du charriage

Le suivi des crues qui se sont produites entre 1997 et 2002 montre que la charge de fond est mise en mouvement 6 à 7 fois par an en moyenne sur les 3 cours d'eau (Fig. 134). Cette valeur cache cependant de fortes disparités inter-annuelles. Les fréquences annuelles de charriage s'étendent en effet de 2 à 13 événements par an. Des différences importantes sont également observées entre les cours d'eau pour une même période. L'année 2002 illustre bien cette variabilité avec 11 crues sur la Bédoux et seulement 5 sur l'Esconavette. On observe également en 2001 13 crues sur la Barnavette et seulement 9 sur la Bédoux. Ceci témoigne de l'existence de phénomènes pluvieux très localisés qui peuvent occasionner de fortes crues sur une rivière alors que rien ne se passe dans le bassin versant voisin. Ainsi, sur 58 jours de charriage recensés, seulement 19 ont été actifs sur les 3 cours d'eau, ce qui représente un rapport de 33%. La majorité de ces crues se sont produites à l'automne et en hiver (12). En revanche, les crues de saisons chaudes sont souvent très localisées. Sur 20 événements exclusifs (observés sur un seul cours d'eau), 14 se sont produits en été ou au printemps. Ces observations révèlent la nature contrastée des phénomènes pluvieux à l'origine du transport des sédiments. Les crues de saisons froides sont liées à des perturbations régionales, qui génèrent des crues sur de nombreux affluents. Inversement, les crues de saisons chaudes résultent de perturbations locales, de nature souvent orageuse, qui produisent des crues ponctuelles. Ce fut par exemple le cas du 10 juillet 1997 où une crue brutale est survenue sur la Barnavette (Fig. 135), alors qu'aucune montée des eaux n'a été observée sur l'Esconavette et la Bédoux. Le pic de crue a été estimé ce jour là à  $7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  sur la Barnavette. On peut également citer l'épisode pluvieux du 20 septembre 2000, à l'origine d'une crue mobilisatrice sur la Barnavette alors que l'Esconavette est restée inactive. Les hydrogrammes de crue montrent bien l'occurrence d'une montée rapide des eaux sur la Barnavette, en relation avec un pic de précipitations se produisant aux alentours de 9h30, dont l'intensité maximale a été de 35 mm/h (Fig. 136). Ce pic se produit également sur l'Esconavette mais son intensité est moindre (18 mm/h). D'autre part, le total précipité y est également plus faible (26,8 contre 31,4 sur la Barnavette). Ces différences en terme de pluie se traduisent par une crue beaucoup plus faible qui a été incapable de mobiliser la charge de fond.

La répartition saisonnière des crues mobilisatrices montre que le transport solide peut se produire à tout moment dans l'année (Tab. 36). Néanmoins, l'automne reste la saison la plus propice à ce genre d'événement, avec un rapport de 36%. Suivent ensuite le printemps (25%), l'hiver (19%) et l'été (19%). Il est intéressant de noter l'occurrence de crues d'été sur ces cours d'eau alors que les relevés hydrologiques conduits à Luc-en-Diois depuis 1907 révèlent l'absence quasi totale de tels événements sur le cours de la Drôme. Ceci confirme à nouveau le fait que ces crues sont générées par des cellules orageuses puissantes dont l'activité se manifeste sur de petites surfaces de drainage. Il faut également mentionner le nombre élevé de crues d'été observé sur la Bédoux comparativement aux autres bassins. Ceci peut probablement s'expliquer par la position du bassin, plus expo-

sée aux circulations des cellules orageuses en provenance du sud via le Col de Prémol, situé sur la ligne de partage des eaux entre la Béoux et l'Establet.



**Début des observations:**

1: 15/01/1997

2: 17/06/1997

3: 15/07/1997

\* : fondée en partie sur l'enregistrement automatique des hauteurs d'eau et des seuils de mise en mouvement déterminés sur la période 1997-2001

**Figure 134**

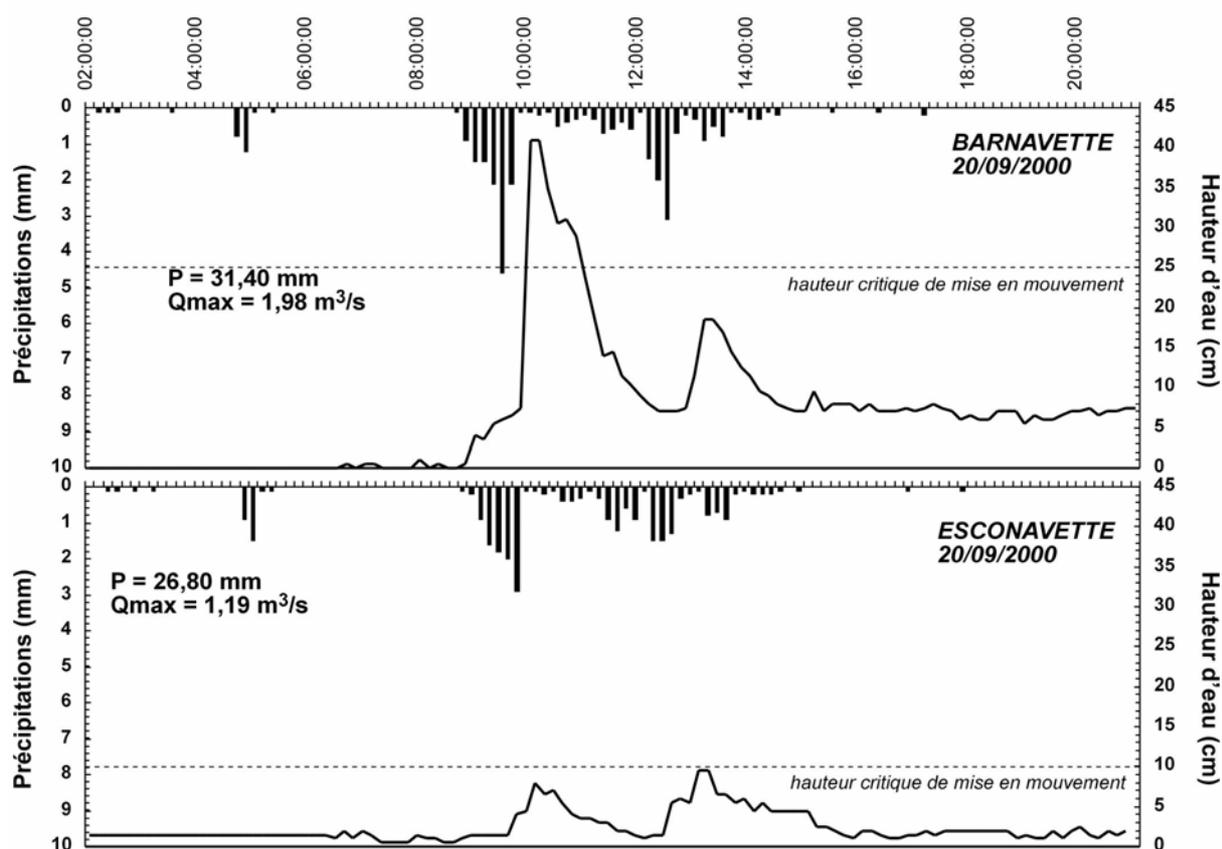
Variabilité inter-annuelle du nombre de crues ayant entraîné la mise en mouvement de la charge de fond sur la période 1997-2002



**Figure 135**

Séquence de photos prises lors de la crue survenue suite à l'épisode orageux du 10 juillet 1997 sur la Barnavette ; l'intervalle de temps entre les 2 prises de vue est de l'ordre de 30 minutes

Troisième Partie: Le transport de la charge de fond



**Figure 136**

Hydrogrammes de crues et précipitations du 20 septembre 2000 sur l'Esconavette et la Barnavette ; P : précipitations totales, Qmax : estimation du pic de crue ; les précipitations sont indiquées sous la forme d'un histogramme structuré par intervalles de 10 minutes, les courbes correspondent aux hauteurs d'eau

**Tableau 36**

Répartition saisonnière des crues ayant entraîné une mobilisation de la charge de fond sur la période 1997-2002; résultats en nombre de crues observées

Cours d'eau	Printemps	Été	Automne	Hiver	TOTAL
Esconavette	12	5	14	8	39
Barnavette	8	7	15	7	37
Béoux	8	10	12	7	37
<b>TOTAL</b>	<b>28</b>	<b>22</b>	<b>41</b>	<b>22</b>	<b>113</b>

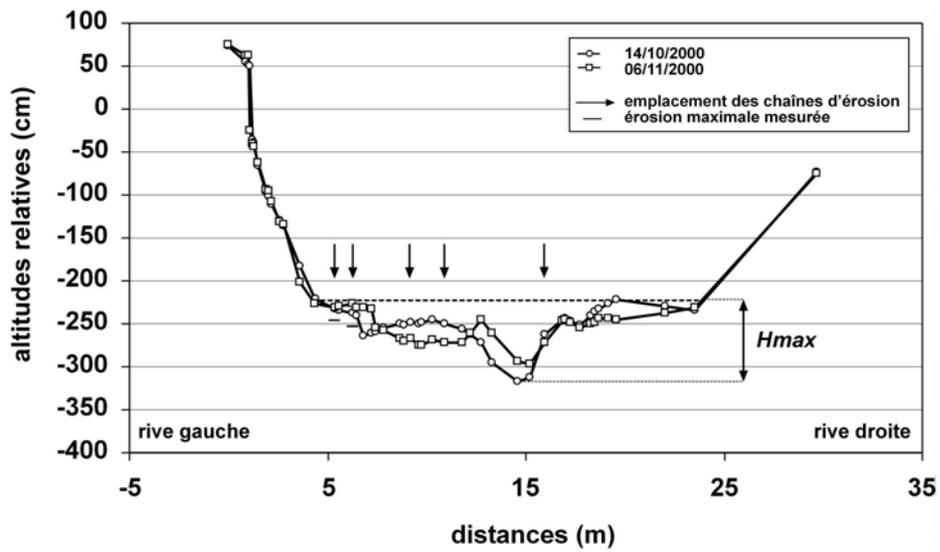
### 3.2. Seuils de mise en mouvement de la charge de fond

La connaissance des seuils de mise en mouvement de la charge de fond est une question fondamentale qui se doit d'être abordée dans toute étude de transport solide. Elle permet d'appréhender la fréquence du charriage et elle constitue le fondement de toutes les démarches qui visent à déterminer la capacité de transport solide de la rivière. Nous avons évalué ces seuils au travers de différents paramètres, afin de comparer les résultats obtenus avec les valeurs communément observées dans les rivières graveleuses. Toutes les analyses qui suivent ne sont fondées que sur les crues mesurées après juillet 1999, date à laquelle les dispositifs de mesure hydrologique ont été installés.

La démarche a tout d'abord consisté à déterminer les hauteurs d'eau critiques de mise en mouvement ( $H_{cr}$ ) à partir d'une analyse fine des relations qui existent entre les hauteurs d'eau maximales atteintes pendant les crues au droit des stations sédimentologiques et les phénomènes de creusement et de remblaiement mesurés à l'aide du suivi topographique et des chaînes d'érosion. Ces hauteurs critiques ont ensuite été transposées en terme de force tractrice et de puissance hydraulique.

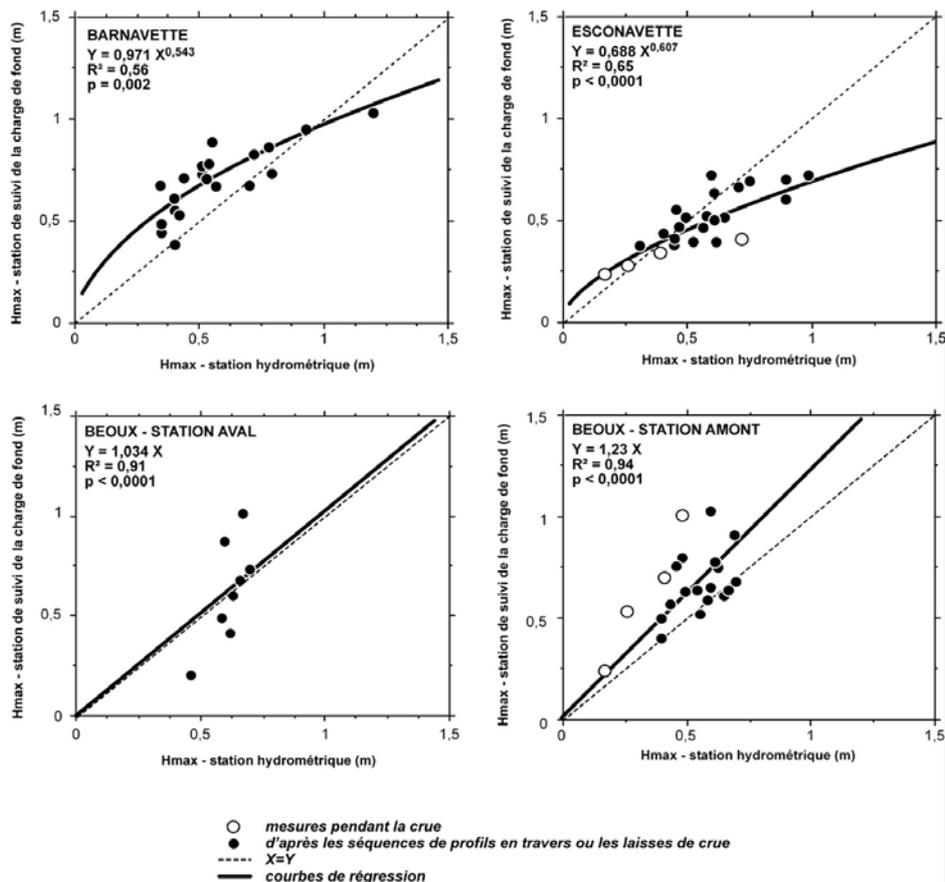
Les hauteurs d'eau maximales atteintes au droit des stations sédimentologiques ont été déterminées, dans la mesure du possible, à partir des laisses de crue (dépôts de limons et de débris végétaux, rafraîchissements des affleurements en berge vive). Lorsque celles-ci se sont avérées difficilement lisibles ou absentes, les hauteurs maximales ont été reconstituées à partir des séquences de profils en travers mesurés avant et après les crues, qui nous permettent d'identifier les points les plus élevés affectés par les phénomènes de creusement et de remblaiement du lit. La hauteur d'eau maximale a été calculée en soustrayant l'altitude de ces points avec l'altitude minimale atteinte par le fond du lit pendant la crue (Fig. 137). Ce protocole est fondé sur l'hypothèse que le creusement maximal se produit pendant le pic de crue, comme l'attestent les travaux de Jackson et Beschta [1982]. Nous obtenons ainsi une évaluation minimale de la hauteur d'eau correspondant au pic de crue, dans la mesure où les points les plus élevés affectés par un changement topographique ont forcément été submergés pendant la crue. Ces hauteurs maximales ont ensuite été mises en relation avec celles mesurées au droit des stations hydrométriques, afin d'obtenir un modèle d'équivalence entre les deux stations (Fig. 138). Ces relations intègrent également quelques sondages effectués pendant les crues. Les courbes montrent qu'en général, les profondeurs d'eau au droit du profil de suivi du transport solide sont inférieures à celles mesurées au droit des stations hydrométriques, notamment pour les forts débits. Cette observation est logique compte tenu des largeurs plus faibles des stations de jaugeage. Il faut enfin signaler que la relation obtenue sur la Béoux (station amont) tend à sous-estimer les hauteurs d'eau si on se réfère aux mesures effectuées en crue. Ceci tient au fait que le lit de la Béoux présentait lors des sondages une géométrie particulière, caractérisée par un chenal d'étiage incisé dans ses bancs de graviers. Cette configuration contribue à concentrer l'écoulement dans une section étroite et donc à augmenter les hauteurs d'eau dans des conditions de faible débit.

Troisième Partie: Le transport de la charge de fond



**Figure 137**

Estimation de la hauteur d'eau correspondant au pic de crue ( $H_{max}$ ) à partir d'une séquence de profils en travers mesurés avant et après la crue ; exemple de la crue du 06/11/2000 survenue sur la Barnavette



**Figure 138**

Relations entre les hauteurs d'eau maximales mesurées au droit des stations hydrométriques et mesurées ou estimées au droit des stations de suivi de la charge de fond (stations sédimentologiques); les points figurés en blanc correspondent aux mesures effectuées pendant la crue ; les analyses de régression linéaires obtenues sur la Béoux ont été calculées sans terme constant, de façon à forcer la droite à passer par l'origine

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

Ces hauteurs d'eau reconstituées ont été mises en relation avec les sections solides mobilisées mesurées à partir du suivi des profils en travers (Fig. 139). Nous obtenons des nuages de points bien regroupés qui peuvent être englobés entre des courbes-enveloppes. Les coordonnées à l'origine de ces courbes donnent un intervalle dans lequel sont comprises les hauteurs d'eau critiques. Nous obtenons ainsi pour les 4 stations les intervalles suivants, en mètres :

- Esconavette : [0,30 ; 0,45]
- Barnavette : [0,50 ; 0,65]
- Béoux – station amont : [0,50 ; 0,70]
- Béoux – station aval : [0,45 ; 0,60]

Ces seuils de mise en mouvement peuvent être traduits en terme de force tractrice unitaire à l'aide de la formule de Du Boys [1879] :

$$\tau = \rho g R s$$

avec,  $\tau$ , la force tractrice unitaire en  $N m^{-2}$   
 $\rho$ , la masse volumique du fluide ( $1000 kg m^{-3}$ )  
 $g$ , l'accélération de la gravité ( $9,81 m s^{-2}$ )  
 $R$ , le rayon hydraulique en  $m$   
 $s$ , la pente du lit en  $m m^{-1}$

Le rayon hydraulique s'apparente ici à la hauteur d'eau dans la mesure où les tronçons d'observation se caractérisent par des lits larges et peu profonds. Les gammes de forces tractrices critiques obtenues sont les suivantes :

- Esconavette : [76 ; 115]
- Barnavette : [59 ; 76]
- Béoux – station amont : [78 ; 110]
- Béoux – station aval : [71 ; 94]

Le regroupement des points de mesure sur un même graphique (Fig. 140) donne des forces tractrices critiques comprises entre 60 et 100  $N m^{-2}$ . On observe que les points mesurés sur la Barnavette sont situés au-dessus des autres, ce qui implique que pour des forces tractrices similaires, ce cours d'eau présente une plus grande mobilité du lit.

Ces forces tractrices critiques correspondent aux contraintes de cisaillement qui s'exercent dans le fond du lit, car elles ont été déterminées à partir des hauteurs d'eau maximales. Si nous souhaitons établir les correspondances en terme de force tractrice adimensionnelle à partir des caractéristiques granulométriques des bancs, nous devons prendre en considération l'altitude de ces unités morphologiques avant la crue. Nous pouvons alors calculer les hauteurs d'eau maximales de submersion des bancs et déterminer ainsi le critère adimensionnel de Shields. Cet exercice a été réalisé à partir des indicateurs de mobilité que sont les chaînes d'érosion. Nous avons ainsi mis en relation les va-

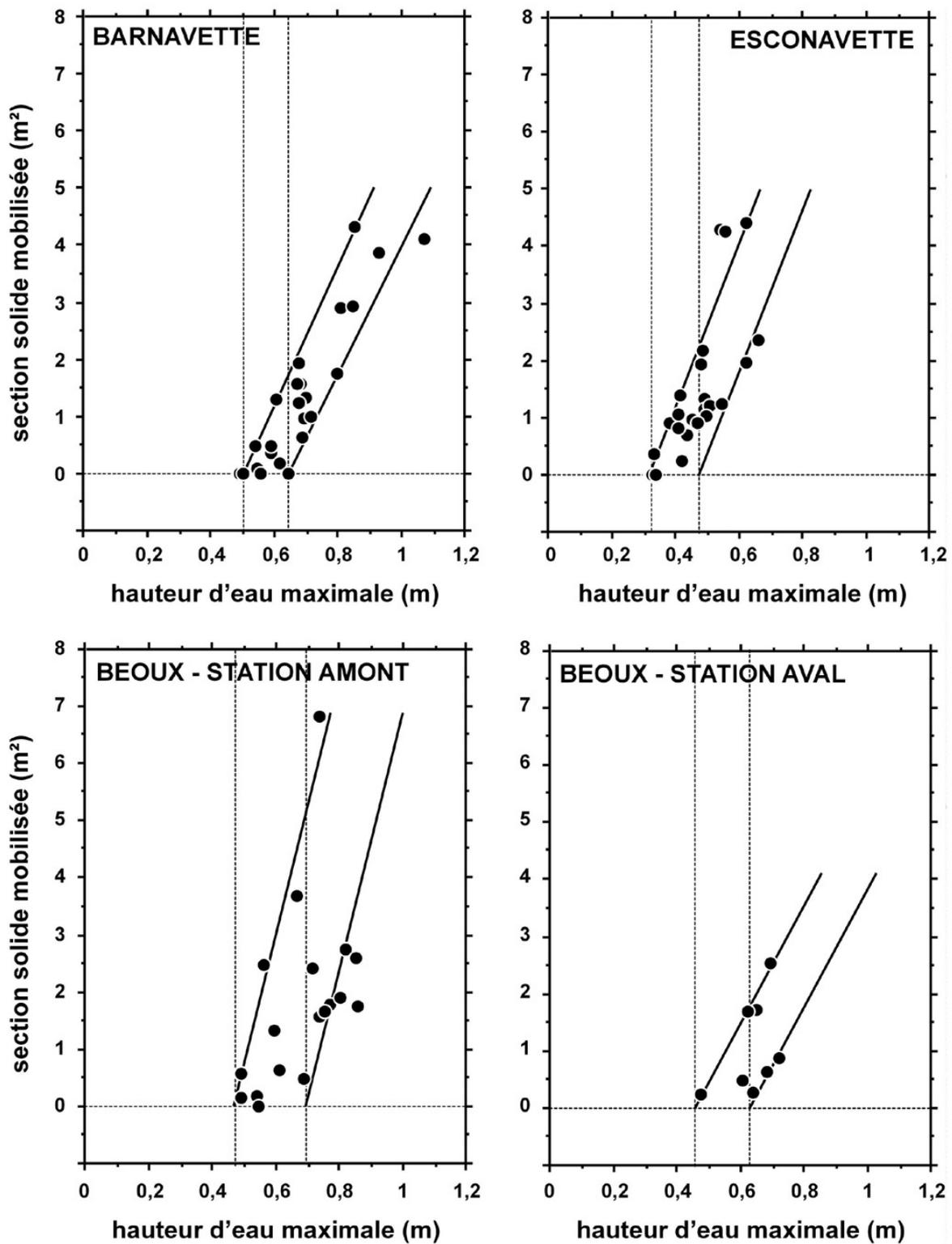
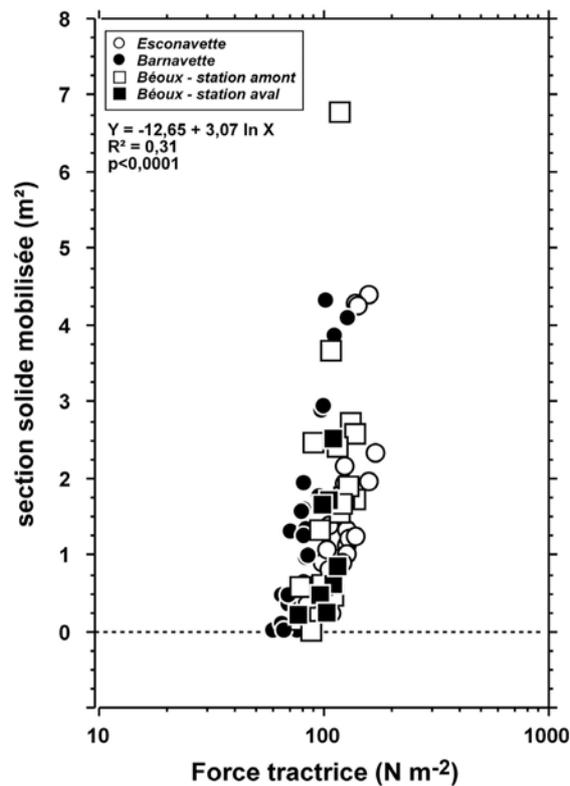


Figure 139

Relations entre la hauteur d'eau maximale de la crue au droit des stations sédimentologiques et la section solide mobilisée permettant d'appréhender les hauteurs d'eau critiques de mise en mouvement de la charge de fond à partir de courbes-enveloppes ; les sections solides ont été mesurées à partir du suivi des profils en travers ; les droites ont été ajustées visuellement aux nuages de points



**Figure 140**

Relation semi-log entre la force tractrice au droit des stations sédimentologiques et la section solide mobilisée

leurs de creusement et de remblaiement enregistrées par les chaînes avec les hauteurs de submersion (Fig. 141). Outre son intérêt en terme de calage des seuils de mise en mouvement, cette approche permet également de faire quelques observations intéressantes. Les valeurs de creusement et de remblaiement oscillent entre 0 et 40 cm et elles sont indépendantes des hauteurs d'eau (Fig. 141). Les seuils de mise en mouvement peuvent être lus directement sur ces graphiques en considérant les hauteurs d'eau à partir desquelles on commence à observer un creusement du lit. Nous obtenons ainsi des hauteurs critiques comprises entre 5 et 35 cm. Ces valeurs ont été transcrites en terme de force tractrice critique adimensionnelle à partir du  $D_{50}$  des bancs à l'aide de la formule de Shields [Knighton, 1998] :

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{gD(\rho_s - \rho)}$$

avec  $\theta_c$ , le critère adimensionnel de Shields

$\tau_c$ , la force tractrice critique en  $N m^{-2}$

$D$ , le diamètre de la particule considérée en m

$\rho_s$ , la masse volumique du sédiment (estimée à  $2650 kg m^{-3}$ )

Les calculs donnent des valeurs comprises entre 0,019 et 0,060 (Tab. 37). La moyenne se situe à 0,043.

**Tableau 37**

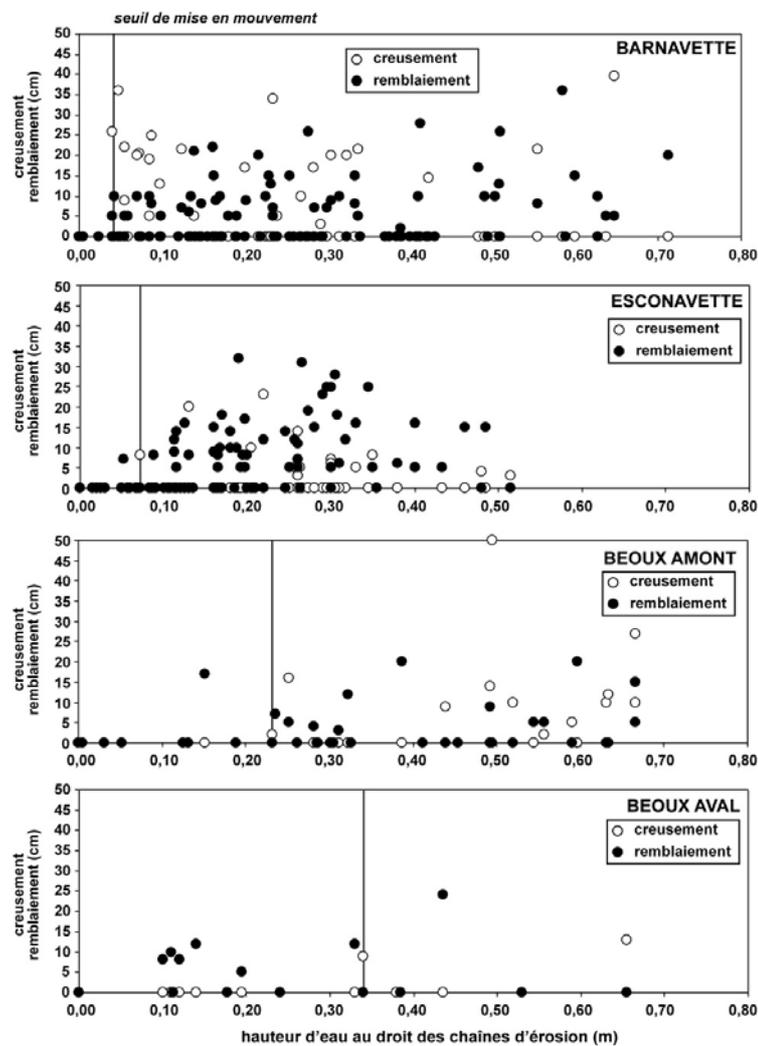
Forces tractrices critiques de mise en mouvement de la charge de fond et critères adimensionnels de Shields obtenus sur les stations de suivi du transport solide

Cours d'eau	Pente ( $m\ m^{-1}$ )	$D_{50}$ (mm)	$H_{cr}$ (m)	$\tau_{cr}$ ( $N\ m^{-2}$ )	$\theta_c$
Barnavette	0,012	19	0,05	6	<b>0,019</b>
Béoux – station aval	0,016	61	0,34	53	<b>0,054</b>
Béoux – station amont	0,016	37	0,23	36	<b>0,060</b>
Esconavette	0,026	27	0,07	18	<b>0,041</b>

$H_{cr}$  : hauteur d'eau critique de mise en mouvement des bancs

$\tau_{cr}$  : force tractrice critique de mise en mouvement des bancs

$\theta_c$  : critère adimensionnel de Shields

**Figure 141**

Relations entre la hauteur de submersion des chaînes calculée par rapport à la position avant la crue et les valeurs de creusement et de remblaiement mesurées ; ces observations nous permettent de déterminer les hauteurs critiques de mise en mouvement des particules

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

Les données recueillies sur chacune des stations nous permettent également d'évaluer les débits et les puissances hydrauliques critiques. Les hauteurs d'eau critiques au droit des stations hydrologiques ont été retranscrites en terme de débit à l'aide d'une méthode indirecte fondée sur l'équation de Manning-Strickler. Cette formule se présente sous la forme suivante :

$$Q = \frac{RH^{2/3} s^{1/2} A}{n}$$

Avec  $Q$ , le débit en  $m^3 s^{-1}$

$RH$ , le rayon hydraulique en  $m$

$s$  la pente de la ligne d'eau en  $m m^{-1}$

$A$ , la section d'écoulement en  $m^2$

$n$ , le coefficient de rugosité

Toute la difficulté de cette approche réside dans la valeur que l'on attribue au coefficient de rugosité. Afin de déterminer ces coefficients, nous avons mesuré à plusieurs reprises les vitesses d'écoulement en crue à l'aide de flotteurs sur chacune des stations. Sur l'Esconavette, les valeurs obtenues sont comprises entre 0,025 et 0,034. Nous avons retenu la valeur moyenne, qui est de 0,029. Sur la Barnavette, le coefficient de rugosité oscille entre 0,026 et 0,031. La moyenne est de 0,028. Enfin, sur la Béoux, nous obtenons un coefficient de 0,027. Toutes ces valeurs sont très proches de celles obtenues à partir des formules qui proposent de calculer le coefficient de rugosité à partir de la taille moyenne des particules qui composent le fond du lit [Strickler, 1923, cité par Gordon *et al.*, 1992; Simons et Senturck, 1977, cité par Bravard et Petit, 1997 ; Kellerhalls, 1967, cité par Smart *et al.*, 2002] (Tab. 38). Ceci suggère que les pertes de charge induites par les irrégularités de forme de la section ou par les obstructions sont très faibles. Ceci est bien le cas de nos stations hydrométriques qui ont été choisies justement sur des critères d'homogénéité géométrique, de façon à admettre un écoulement en crue le plus proche possible des conditions d'écoulement uniforme.

#### Tableau 38

Comparaison des coefficients de rugosité obtenus à partir des vitesses d'écoulement en surface avec ceux calculés à partir des caractéristiques granulométriques du fond du lit

Cours d'eau	$n^*$	$n$ [Strickler, 1923] <sup>1</sup>	$n$ [Simons et Senturck, 1977] <sup>2</sup>	$n$ [Kellerhalls, 1967] <sup>3</sup>
Barnavette	0,028	0,021	0,022	0,022
Béoux	0,027	0,024	0,026	0,028
Esconavette	0,029	0,022	0,026	0,027

\* d'après les mesures de vitesse en surface

1. d'après la formule  $n = 0,013 D_{50}^{1/6}$

2. d'après la formule  $n = 0,038 D_{90}^{1/6}$

3. d'après la formule  $n = 0,049 D_{90}^{1/4}$

L'évaluation indirecte des débits critiques donne des valeurs comprises entre 1,57 et 9,02 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (Tab. 39). Si nous pondérons ces valeurs par les superficies drainées, nous obtenons des débits spécifiques compris entre 0,12 et 0,30 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>. D'autre part, si nous considérons le rapport entre ces débits et les valeurs du débit de fréquence 1,5 ans (débit à pleins bords théorique), estimé d'après la formule régionale fondée sur les superficies drainée (Fig. 20), nous obtenons des résultats compris entre 0,83 et 2,39 sur 3 stations. Ces chiffres doivent être interprétés avec précaution dans la mesure où le débit de fréquence 1,5 ans constitue une moyenne journalière. Ceci nous conduit à sur-estimer le rapport  $Q_{cr}/Q_{1,5}$ . La valeur de 2,39 a été obtenue sur le site aval de la Béoux. Ce résultat n'est pas surprenant compte tenu du fait que ce tronçon se caractérise par un banc grossier dont la mise en mouvement nécessite des débits plus élevés. D'après nos observations, ces bancs ne sont généralement travaillés que par les grosses crues d'automne. Ces débits critiques ont été comparés avec les valeurs calculées à partir des 2 formules les plus communément utilisées pour évaluer ce paramètre. Il s'agit des formules de Schoklitsch [1962] et Bathurst *et al.* [1987], citées par Ferguson [1994] :

$$q_c = 0,26 ((\rho_s - \rho) - 1)^{5/3} D_{40}^{3/2} / s^{7/6} \text{ Schoklitsch [1962]}$$

Avec  $q_c$ , le débit critique unitaire en m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>

$D_{40}$ , le percentile 40 de la distribution granulométrique en m

$$q_c = (g D_{16}^3)^{1/2} 0,21 s^{-1,12} \text{ Bathurst et al. [1987]}$$

avec  $D_{16}$ , le percentile 16 de la distribution granulométrique en m

Les comparaisons montrent que nos débits critiques sont toujours situés entre les valeurs obtenues à partir de ces 2 formules, tout en étant souvent plus proches des débits calculés à partir de la formule de Bathurst. Les résultats obtenus à partir de la formule de Schoklitsch sont souvent nettement au-dessus de nos estimations. Les puissances spécifiques critiques calculées à partir de nos débits critiques, en prenant en compte la largeur de la bande active, oscillent entre 15 et 87 W m<sup>-2</sup> (Tab. 39). La formule utilisée est la suivante :

$$\omega = \frac{\rho g Q_c s}{W}$$

avec  $\omega$ , la puissance spécifique critique en W m<sup>-2</sup>

$Q_c$ , le débit critique en m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>

$W$ , la largeur de la bande active en m

La dernière approche d'évaluation des seuils de mise en mouvement nous a conduit à mettre en relation les puissances spécifiques avec des paramètres de taille des particules mobilisées pendant les crues (Fig. 142 A et B). Ce traitement intègre l'ensemble des événements mesurés après juillet 1999 et pour lesquels nous disposons de relevés de distances de transport. Nous avons calculé pour chaque crue le  $D_{50}$  et le  $D_{84}$  des particules qui ont été mises en mouvement et retrouvées après l'évène-

**Tableau 39**

*Débits et puissances hydrauliques critiques de mise en mouvement de la charge de fond sur les stations de suivi du transport solide*

Cours d'eau	$Q_{cr}$ ( $m^3 s^{-1}$ )	$Q_{cr}$ ( $m^3 s^{-1}$ ) <sup>a</sup>	$Q_{cr}$ ( $m^3 s^{-1}$ ) <sup>b</sup>	$\omega_{cr}$ ( $W m^{-2}$ )
Barnavette	1,65	2,76	1,60	15
Béoux – station aval	9,02	12,39	6,30	87
Béoux – station amont	3,12	4,62	2,09	32
Esconavette	1,57	1,86	1,02	20

$Q_{cr}$  : débit critique de mise en mouvement des bancs

$\omega_{cr}$  : puissance hydraulique critique de mise en mouvement des bancs

a : calculé d'après la formule de Schoklitsch [1962]

b : calculé d'après la formule de Bathurst *et al.* [1987]

ment. Nous observons une bonne adéquation de nos données avec les modèles obtenus suite aux études de transport solide conduites dans les Ardennes (Fig. 142 A et B). La prise en compte du  $D_{50}$  des particules mobilisées donne un nuage de points très proche de la relation obtenue sur la Rulles, rivière torrentielle qui draine un bassin versant de 16,2 km<sup>2</sup> et qui développe une pente de 0,012 m m<sup>-1</sup> [Petit, 1987]. Cette relation est fondée sur des particules dont le diamètre est compris entre 5 et 60 mm. Toutes ces valeurs sont conformes aux attributs morpho-sédimentaires de nos sites. Il apparaît également que la relation de Petit *et al.* [2000], faisant la synthèse des données recueillies sur des rivières ardennaises de taille intermédiaire (bassins versants compris entre 40 et 500 km<sup>2</sup>), se positionne comme une courbe enveloppe passant en-dessous de nos points d'observation. La droite de régression calculée à partir des mesures effectuées sur nos sites est la suivante :

$$\omega_0 = 1,548 D_{50}^{1,07} \quad (R^2 = 0,334 ; p = 0,024)$$

Nous pouvons également tracer une courbe enveloppe qui passe par les points bas de notre nuage de points et dont l'équation est la suivante :

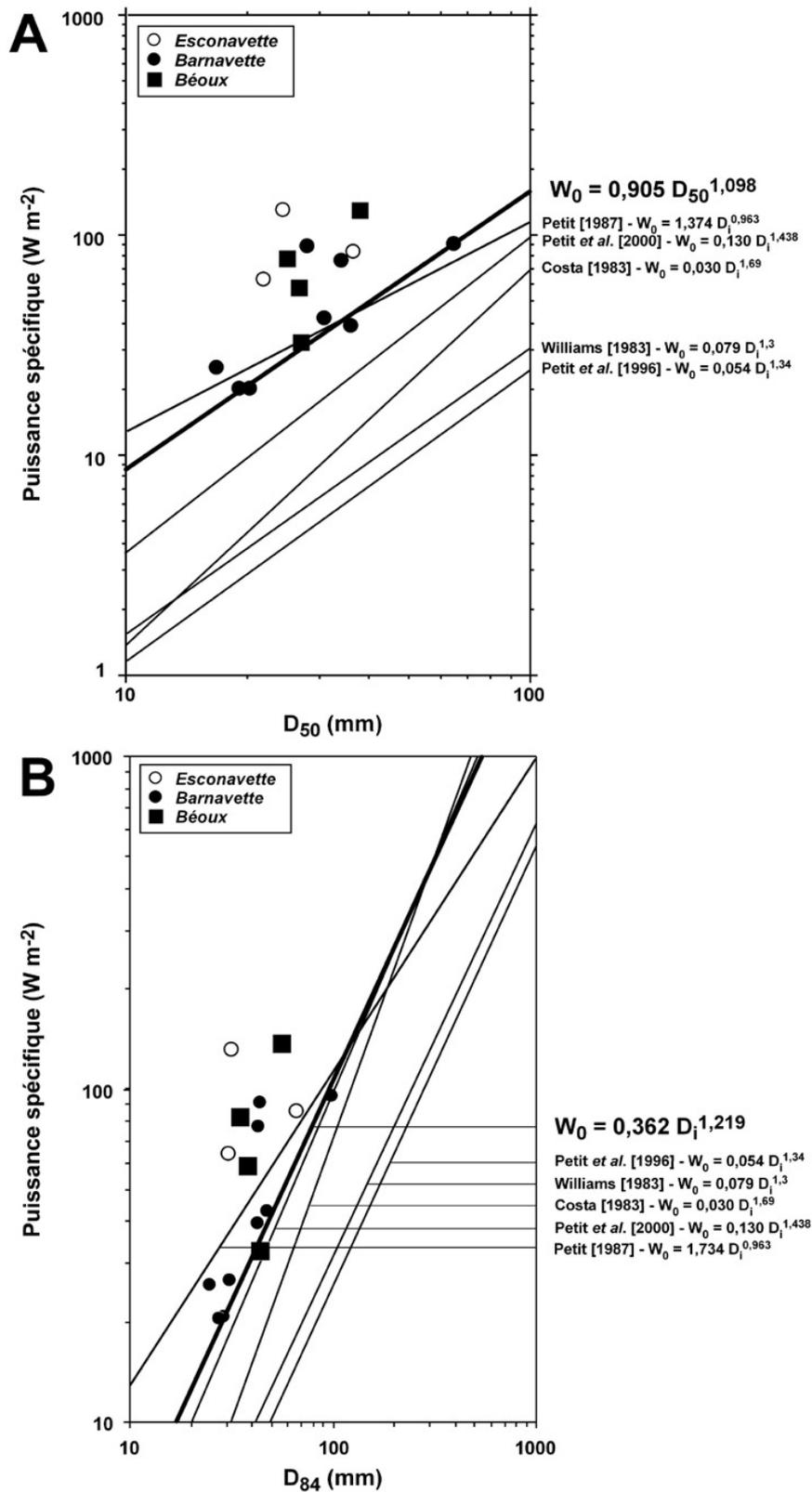
$$\omega_0 = 0,905 D_{50}^{1,098}$$

Il est intéressant de constater que la pente de cette courbe est très proche des modèles proposés par Petit *et al.* [1996 ; 2000] et Williams [1983]. En revanche, la position de notre droite est nettement au-dessus des autres relations, ce qui montre que pour déplacer un diamètre donné, nos rivières doivent produire des puissances spécifiques plus grandes.

Si nous considérons le  $D_{84}$  des particules mobilisées, nos observations se rapprochent plus nettement des modèles obtenus dans les Ardennes (Fig. 142B). La droite mise en évidence sur la Rulles passe au milieu de notre nuage de points et celle définie sur les rivières torrentielles de taille intermédiaire [Petit *et al.*, 2000] fait à nouveau office de courbe enveloppe. La droite de régression obtenue sur la base de nos observations est la suivante :

$$\omega_0 = 1,838 D_{84}^{0,918} \quad (R^2 = 0,28 ; p = 0,0416)$$

La pente est très proche de celle obtenue sur la Rulles [Petit, 1987]. La courbe enveloppe peut être



**Figure 142**

Relation entre la puissance spécifique critique au droit des stations sédimentologiques ( $W_0$ ) et la taille des particules mobilisées ; A :  $D_{50}$  ; B :  $D_{84}$  ; des modèles établis sur d'autres rivières sont indiqués à titre de comparaison

modélisée sous la forme suivante :

$$\omega_0 = 0,362 D_{84}^{1,219}$$

Cette fois ci, nous retrouvons un exposant conforme aux modèles proposés par Petit *et al.* [1996 ; 2000] et Williams [1983]. Les ordres de grandeur obtenus sur nos rivières montrent ainsi des similitudes avec ceux acquis dans d'autres environnements proches.

### 3.3. Synthèse

Les observations relatives à la mobilité de la charge de fond conduites entre 1997 et 2002 sur 3 affluents de la Drôme démontrent que les sédiments grossiers sont mis en mouvement 6 à 7 jours par an en moyenne. Ce résultat est conforme aux ordres de grandeur de Couvert *et al.* [1999] qui proposent des fréquences de charriage comprises entre 1 et 10 jours par an sur les rivières torrentielles à régime méditerranéen. Ces fréquences sont également très proches de celles observées sur quelques têtes de bassin ardennaises où le transport de la charge de fond se produit 8 à 10 jours par an [Petit *et al.*, 1996]. Nous avons également observé que le charriage peut se produire à n'importe quelle saison, même si l'automne et le printemps constituent les périodes les plus propices à ce genre de phénomène. L'occurrence relativement forte de crues d'été sur les affluents constitue cependant une originalité par rapport aux observations hydrologiques conduites sur la Drôme, qui révèlent l'absence quasi totale de transport solide durant la période estivale. Ceci s'explique par l'activité de cellules orageuses localisées qui génèrent des crues isolées. On peut donc supposer que les confluences sont des sites d'accumulations sédimentaires temporaires liées aux crues estivales des affluents et que les crues d'automne de la Drôme bénéficient probablement d'une fourniture sédimentaire supérieure par rapport aux événements de printemps.

Les seuils de mise en mouvement de la charge de fond ont été évalués à l'aide de plusieurs paramètres. Les forces tractrices critiques fondées sur le  $D_{50}$  des bancs oscillent entre 6 et 53  $N m^{-2}$ . Ces valeurs donnent un critère adimensionnel de Shields compris entre 0,019 et 0,060. Nous obtenons une moyenne de 0,043 qui entre dans la gamme des cortèges sédimentaires moyennement imbriqués et colmatés. Ces structures se caractérisent par un  $\theta_c$  généralement compris entre 0,035 et 0,065 et elles offrent donc peu de résistance à l'entraînement des particules [Gordon *et al.*, 1992]. Cette correspondance n'est pas surprenante dans la mesure où nos valeurs ont été obtenues à partir des chaînes d'érosion implantées dans des bancs de graviers dont la structure sédimentaire est relativement lâche. Ces valeurs sont conformes à celles communément admises sur les rivières graveleuses. Komar [1996, cité dans Bravard et Petit, 1997], dans une synthèse récente sur la question recommande une valeur de 0,045. Garcia *et al.* [2000] observent sur la Tordera, une rivière torrentielle méditerranéenne des chaînes côtières de Catalogne, des valeurs comprises entre 0,048 et 0,096. Wilcock *et al.* [1996] proposent une valeur de 0,035 pour une grande rivière graveleuse de Californie où la mobilité des particules a été étudiée à partir de traceurs. Nous pouvons également

citer les travaux de Petit *et al.* [1996], conduits sur des rivières caillouteuses ardennaises, où les valeurs oscillent entre 0,023 et 0,027 pour les petites crues. Si nous considérons la moyenne obtenue sur nos 3 cours d'eau, qui est de 0,043, nous nous rapprochons de la valeur de synthèse proposée par Komar [1996]. Il faut peut être envisager une sous estimation de nos seuils de mise en mouvement qui pourrait s'expliquer par une sous estimation des hauteurs de submersion des bancs. Néanmoins, cette imprécision est probablement nuancée par le fait que nos estimations sont fondées sur la force tractrice totale, à laquelle il faudrait retrancher la force tractrice due à la résistance des formes qui n'intervient pas dans la mobilisation des matériaux [Petit, 1989].

Il faut d'autre part mentionner des différences importantes entre les 4 sites étudiés. Les plus fortes valeurs de  $\theta_c$  sont observées sur la Bédou. Ceci rejoint les observations faites lors de l'insertion des chaînes. Nous avons eu beaucoup plus de difficultés à les installer sur ce cours d'eau et ceci plaide en faveur d'une structure sédimentaire plus étroitement imbriquée. Nous observons également sur la figure 122 que les éléments grossiers sont plus abondants sur ce cours d'eau. Inversement, la faible valeur de  $\theta_c$  obtenue sur la Barnavette doit être mise en relation avec la structure particulière des bancs où la couche graveleuse de surface repose sur un remplissage à matrice sableuse abondante. Ceci est particulièrement visible sur la figure 126 D. Il existe donc des coïncidences entre les écarts de  $\theta_c$  observés et les structures sédimentaires des sites étudiés.

Les débits critiques de mise en mouvement de la charge de fond ont été estimés entre 1,6 et 3,1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> pour les sites caractérisés par la présence de bancs fins. La pondération par les superficies drainées donne des valeurs comprises entre 0,10 et 0,16 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>. Ces chiffres sont légèrement inférieurs à celui obtenu sur la rivière Lainbach dans les Préalpes bavaroises où le débit critique spécifique de mise en mouvement de la charge de fond est de 0,19 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup> [Gintz *et al.*, 1996]. La comparaison est intéressante dans la mesure où cette petite rivière torrentielle présente une pente de 0,022 m m<sup>-1</sup>, proche de celle de nos cours d'eau. La supériorité de son débit critique peut s'expliquer par une granulométrie plus grossière, le D<sub>50</sub> de la charge de fond étant compris entre 50 et 65 mm, mais également par une résistance à l'écoulement accrue du fait de la présence d'alternances en marche-cuvette. En revanche, le débit critique nécessaire à la mise en mouvement du banc grossier équipé sur la Bédou est nettement supérieur puisqu'il atteint 9 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (soit 0,3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>). Nous avons en effet observé que ces bancs ne sont remaniés que lors des grosses crues qui se produisent généralement en automne. Il faut également souligner la bonne adéquation de ces débits critiques avec ceux prédits par la formule de Bathurst *et al.* [1987], faisant la synthèse de données recueillies en chenal artificiel et en conditions naturelles. En revanche, la formule plus ancienne de Schoklitsch [1962] tend à surestimer les débits critiques lorsqu'on l'applique sur nos rivières.

Les puissances hydrauliques critiques ont également fait l'objet d'une évaluation à partir de la mobilisation des parcelles peintes. La mise en relation de la granulométrie des éléments déplacés et des puissances spécifiques maximales atteintes pendant les crues procure des résultats comparables à ceux obtenus sur plusieurs rivières torrentielles ardennaises [Petit, 1987 ; Petit *et al.*, 2000]. Cette

similitude n'est pas fortuite car plusieurs points communs existent avec nos rivières. La Rulles, dont les puissances critiques présentent le plus d'affinité avec nos valeurs, se caractérise par une pente, une granulométrie et une surface drainée presque identique à la Barnavette. D'autre part, la morphologie en alternance de seuils et de mouilles est également peu différente de celle observée le long de nos tronçons d'étude. Il faut également mentionner la prédominance des formations rocheuses imperméables dans la constitution géologique de tous ces bassins versants. Ceci suggère des fréquences de crue du même ordre de grandeur. Il faut enfin signaler que les puissances spécifiques critiques obtenues sont relativement fortes si on les compare à celles prédites par les modèles obtenus sur de grandes rivières [Williams, 1983 ; Petit *et al.*, 1996]. Ceci peut s'expliquer, comme le soulignent Petit *et al.* [2000], par l'importance relative de la résistance des formes dans les petites rivières torrentielles. Cette configuration génère une déperdition d'énergie importante lors des crues et implique des puissances hydrauliques critiques supérieures pour des conditions granulométriques identiques.

Parmi toutes les relations établies sur nos rivières entre la puissance spécifique et la taille des particules mobilisées, il apparaît souhaitable de définir celle qui semble être la plus pertinente pour déterminer les seuils de mise en mouvement. Certaines courbes ont été établies à partir d'analyses de régression, tandis que d'autres correspondent à des courbes enveloppes passant sous les nuages de points. Nous pensons qu'il est préférable d'utiliser ces dernières dans l'évaluation des puissances critiques car elles déterminent les conditions limite du transport sédimentaire et non les conditions moyennes. D'autre part, nous avons également proposé des relations intégrant différents paramètres de la distribution granulométrique. Les modèles obtenus à partir du  $D_{84}$  procurent des résultats plus proches des ordres de grandeur communément admis. D'autre part, cet indicateur est par définition plus à même de retranscrire les plus gros diamètres déplacés lors d'un événement donné. Nous proposons donc d'utiliser la courbe enveloppe définie à partir du  $D_{84}$  dans l'estimation des puissances hydrauliques critiques.

## 4. Les distances de transport de la charge de fond

### 4.1. Approche événementielle

Sur un total de 113 crues observées entre 1997 et 2002 sur les 3 rivières, 56 ont fait l'objet d'une mesure des distances de transport des particules par traçage colorimétrique (Tab. 40). Sur ces 56 événements, 27 se sont produits après juillet 1999, date à partir de laquelle nous avons implanté les dispositifs de mesure hydrologique. Certaines des analyses qui suivent, dont l'objectif a été de mettre en relation les distances parcourues et les intensités de crues ne sont donc fondées que sur ces 27 événements.

La qualité des mesures dépend du nombre de traceurs retrouvés après chaque événement. Celui-ci varie entre 10 et 2189 et est conditionné par l'intensité de la crue (Tab. 40). Il faut cependant distinguer les événements en fonction du protocole de marquage adopté. Lors des premiers relevés effectués sur l'Esconavette, le marquage correspondait à une bande transversale de 1 mètre de large peinte sur toute la largeur du cours d'eau. Cette technique a été utilisée temporairement pour avoir un échantillon le plus représentatif possible des sédiments de surface. Ceci explique le nombre important de traceurs retrouvés suite à ces premiers événements. Il s'agit des crues du 22/06/1997, du 03/07/1997 et du 28/08/1997 mesurées sur l'Esconavette. Si nous considérons les événements qui se sont produits après juillet 1999, il est possible d'établir une relation entre l'intensité de la crue et le nombre de particules retrouvées qui montre que les fortes crues sont les plus difficiles à caractériser en terme de distance moyenne de transport (Fig. 143). Ceci s'explique probablement par le fort pourcentage de marqueurs enterrés, comme l'attestent les expériences conduites avec des traceurs magnétiques qui montrent que ce pourcentage augmente proportionnellement au pic de crue [Hassan *et al.*, 1984, Gintz *et al.*, 1996]. Une estimation du nombre total de particules peintes sur une parcelle de 1 m<sup>2</sup> a été obtenue à partir du dénombrement de l'ensemble des grains marqués (à partir d'un diamètre de 5 mm) sur une surface de 400 cm<sup>2</sup>. Nous obtenons un nombre total de 6000 particules. Ce chiffre nous permet d'obtenir une ordre de grandeur du pourcentage de particules retrouvées après chaque crue. Les valeurs obtenues oscillent entre 0,20 et 9 %. Ces taux sont faibles si nous les comparons à ceux généralement admis pour le traçage colorimétrique. Hassan *et al.* [1984], dans un tableau de synthèse des taux de localisation publiés, présentent des valeurs comprises entre 5 et 80% et considèrent la valeur de 30% comme un ordre de grandeur communément admis pour ce genre de technique.

Le diamètre de l'axe B des traceurs retrouvés a été mis en relation avec la distance parcourue afin d'examiner l'influence de la taille des particules sur leur mobilité (Fig. 144). Nous obtenons une configuration classique qui montre que les éléments grossiers deviennent de plus en plus rares au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone de départ. Il n'existe pas de relation linéaire entre la taille et la distance. Le nuage de points peut être englobé sous une courbe enveloppe qui nous donne la distance maximale que peut parcourir une particule de taille donnée lors d'un événement. Nous pou-

**Tableau 40***Distances de transport et crues mesurées depuis 1997*

Cours d'eau	Date de la crue	Qmax (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	nombre de pics	durée (h)*	Db (m)	N
Barnavette	04/07/1997	NR	NR	NR	27+	400
Barnavette	10/07/1997	NR	NR	NR	57+	366
Barnavette	28/08/1997	NR	NR	NR	53+	259
Barnavette	06/11/1997	NR	NR	NR	117	95
Barnavette	19/12/1997	NR	NR	NR	121	23
Barnavette	31/05/1998	NR	NR	NR	22	325
Barnavette	28/01/1999	NR	NR	NR	75	36
Barnavette	04/03/1999	NR	NR	NR	146	34
Barnavette	26/03/1999	NR	NR	NR	4	NR
Barnavette	21/10/1999	9,38	3	17	179	16
Barnavette	17/04/2000	3,11	1	16	96	34
Barnavette	23/04/2000	1,52	1	9	108	237
Barnavette	28/04/2000	6,38	2	19	237	32
Barnavette	10/05/2000	3,33	1	7	10	546
Barnavette	24/07/2000	1,52	1	9	54	240
Barnavette	20/09/2000	1,98	2	6	73	183
Barnavette	30/09/2000	1,04	3	10	68	450
Barnavette	23/11/2000	8,52	NR	NR	280	14
Barnavette	25/12/2000	2,22	NR	NR	53	172
Barnavette	08/03/2001	4,07	NR	NR	114	11
Béoux	28/08/1997	NR	NR	NR	87	52
Béoux	06/11/1997	NR	NR	NR	114	68
Béoux	02/01/1998	NR	NR	NR	96	10
Béoux	07/04/1998	NR	NR	NR	138	10
Béoux	27/04/1998	NR	NR	NR	162	110
Béoux	10/06/1998	NR	NR	NR	94	156
Béoux	13/08/1998	NR	NR	NR	60	87
Béoux	13/09/1998	NR	NR	NR	108	51
Béoux	28/01/1999	NR	NR	NR	108	14
Béoux	04/03/1999	NR	NR	NR	9	155
Béoux	07/05/1999	NR	NR	NR	127	32
Béoux	19/09/1999	7,10	2	NR	82	27
Béoux	19/02/2000	4,78	2	NR	27	35
Béoux	17/04/2000	12,14	1	8	219	28
Béoux	20/09/2000	2,62	2	NR	100	90
Béoux	02/05/2001	8,88	1	9	145	25
Esconavette	22/06/1997	NR	NR	NR	32	1065
Esconavette	03/07/1997	NR	NR	NR	30	974
Esconavette	28/08/1997	NR	NR	NR	33	2189
Esconavette	06/11/1997	NR	NR	NR	74	254
Esconavette	19/01/1998	NR	NR	NR	6	121
Esconavette	07/04/1998	NR	NR	NR	19	165
Esconavette	14/04/1998	NR	NR	NR	51	269
Esconavette	27/04/1998	NR	NR	NR	66	169
Esconavette	28/01/1999	NR	NR	NR	66	79
Esconavette	03/10/1999	2,06	2	7	5	NR
Esconavette	24/04/2000	3,73	1	10	71	245
Esconavette	28/04/2000	7,46	2	14	99	102

**Tableau 40 (suite)**

Cours d'eau	Date de la crue	Qmax (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	nombre de pics	durée (h)*	Db (m)	N
Esconavette	30/09/2000	0,91	3	10	16	179
Esconavette	14/10/2000	4,95	3	71	96	51
Esconavette	06/11/2000	10,19	2	10	48	98
Esconavette	14/11/2000	3,29	2	15	65	32
Esconavette	08/03/2001	4,85	1	13	58	24
Esconavette	17/03/2001	5,05	2	20	102	196
Esconavette	08/04/2001	2,55	1	6	4	1069
Esconavette	25/09/2001	4,23	2	7	50	91

NR : non renseigné

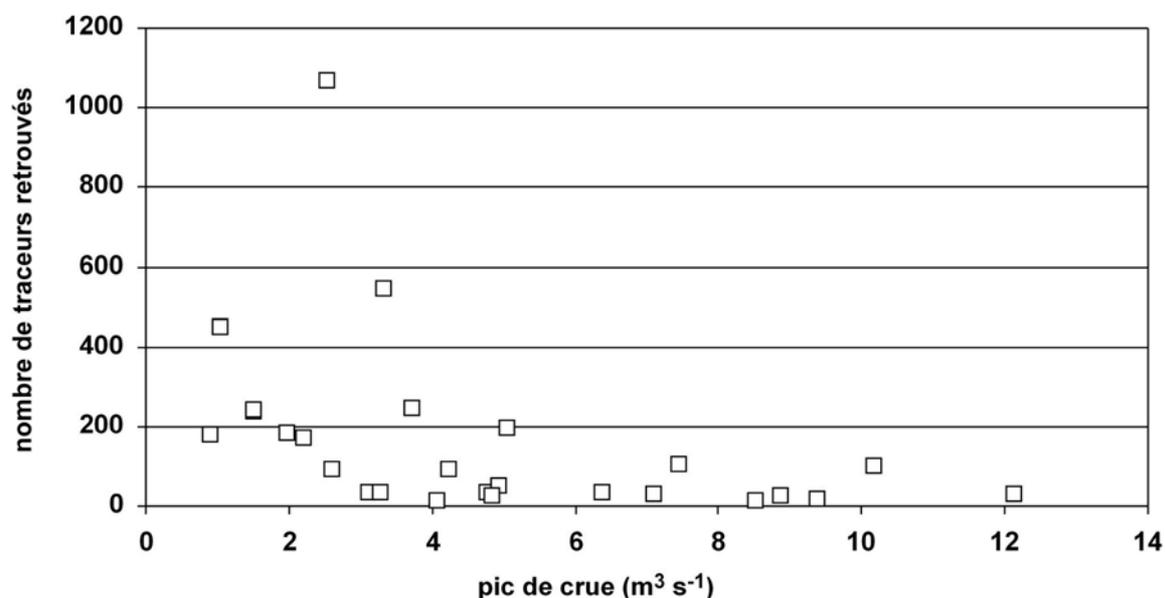
† : relevés incomplets

Qmax : pic de crue en m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>

Db : distance moyenne parcourue par les traceurs retrouvés en m

N : nombre de traceurs retrouvés

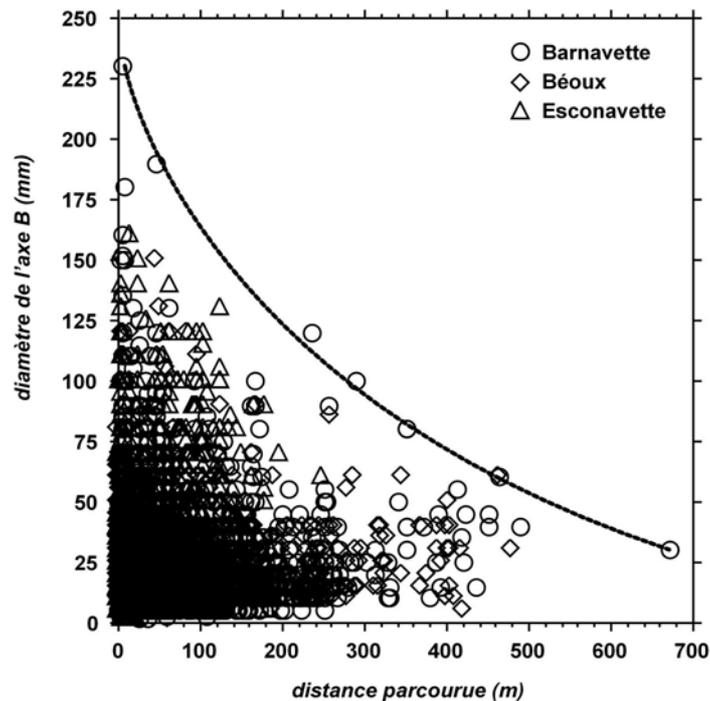
\* d'après les hydrogrammes de crue

**Figure 143**

Relation entre l'intensité de la crue et le nombre de traceurs retrouvés ; ces données comprennent l'ensemble des événements survenus après juillet 1999 sur les 3 cours d'eau et pour lesquels nous disposons d'une cam-

avons par exemple affirmer à partir de ce type de courbe qu'il est peu probable qu'une particule de 100 mm de diamètre parcoure une distance supérieure à 300 mètres lors d'une crue. Nous pouvons également observer que les particules comprises entre 5 et 50 mm peuvent se déplacer au maximum de 500 mètres lors d'une crue. Le point isolé positionné à 680 mètres représente probablement le cumul de plusieurs crues.

La distribution des distances de transport des traceurs mobilisés et retrouvés montre une configuration classique de type exponentiel (Fig. 145 A). Cette distribution, qui englobe la totalité des crues observées sur la période 1997-2001, se modélise selon une fonction log-normale. Ceci signifie qu'à

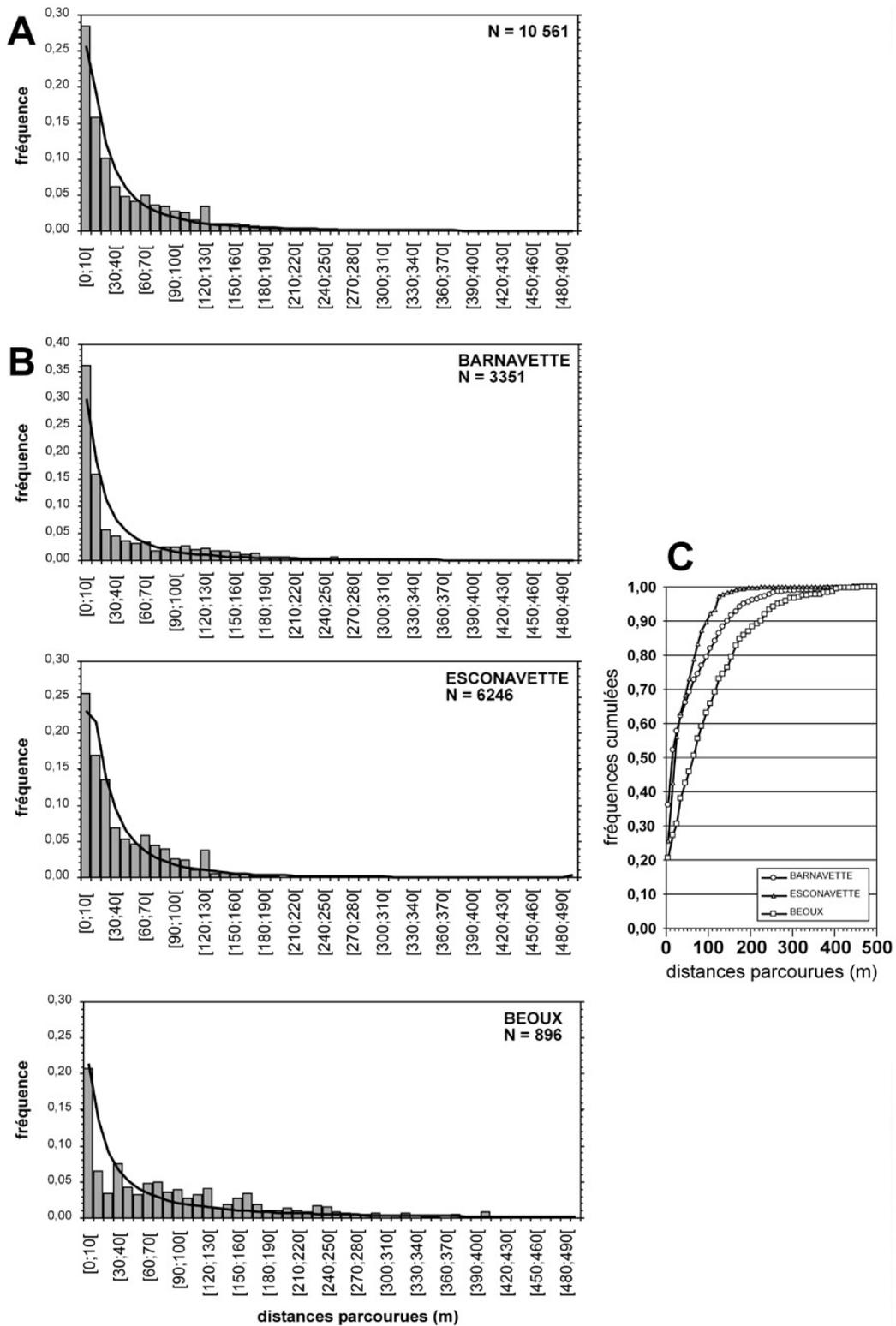


**Figure 144**

*Relation entre le diamètre des particules mobilisées et la distance parcourue fondée sur la totalité des traceurs retrouvés lors des crues survenues sur la période 1997-2001*

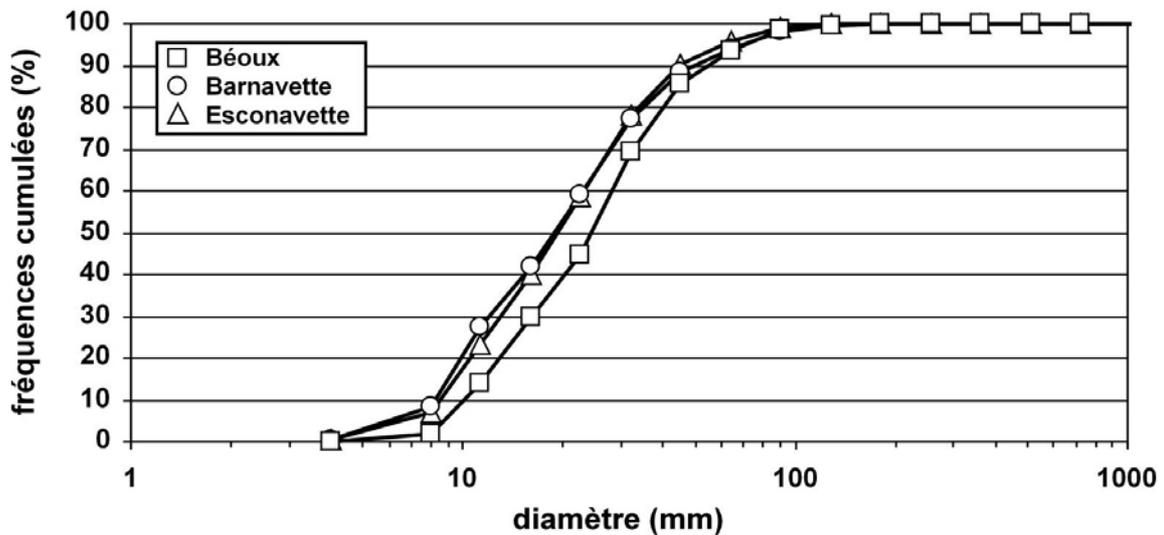
l'issue d'un événement, la majorité des traceurs se déplacent sur de courtes distances. L'inflexion des courbes de distribution se produit pour des distances comprises entre 30 et 40 mètres. On observe également que 95% des particules se sont déplacées sur des distances inférieures ou égales à 125 mètres. Il est donc peu probable qu'une particule parcourt plus de 125 mètres lors d'une crue. Si nous comparons les résultats obtenus sur chaque cours d'eau, on observe des distributions log-normales légèrement différentes (Fig. 145 B et C). La Barnavette et la Béoux se caractérisent par des courbes dont l'inflexion se produit pour des distances plus courtes. En revanche, les particules les plus mobiles se sont déplacées sur de grandes distances. L'Esconavette montre une plus faible dispersion des traceurs vers l'aval. Ainsi, le centile 90 prend les valeurs respectives suivantes pour l'Esconavette, la Barnavette et la Béoux : 102, 149 et 227 mètres. Ces différences ne peuvent être mises en relation avec les caractéristiques granulométriques des traceurs qui sont similaires entre les 3 cours d'eau (Fig. 146). Il faut plutôt envisager ici un contrôle morphologique des distances de transport. Le tronçon de l'Esconavette au sein duquel se diffusent les traceurs est nettement plus large par rapport aux 2 autres cours d'eau. La largeur de la bande active y est de 20 mètres sur une distance de 270 mètres. Sur la Barnavette et la Béoux, les tronçons de diffusion sont constitués d'une alternance de secteurs étroits, inférieurs à 10 mètres en largeur et de secteurs élargis à bancs de graviers. Cette configuration est plus favorable aux longues distances de transport. Nous pouvons en effet considérer que la probabilité qu'une particule se dépose est supérieure dans les tronçons élargis, car les forces tractrices unitaires sont plus faibles. De ce fait, les particules se déplacent sur de plus courtes distances car elles sont rapidement piégées sur les bancs de graviers. Les obstacles

Troisième Partie: Le transport de la charge de fond



**Figure 145**

Distributions des distances de transport événementielles intégrant la totalité des traceurs retrouvés à l'issue des crues mesurées entre 1997 et 2001 ; A : distribution globale ; B : distributions regroupées par cours d'eau ; C : courbes des fréquences cumulées ; N : nombre de particules ; les courbes correspondent aux distributions log-normales calculées à partir des moyennes et écart types



**Figure 146**

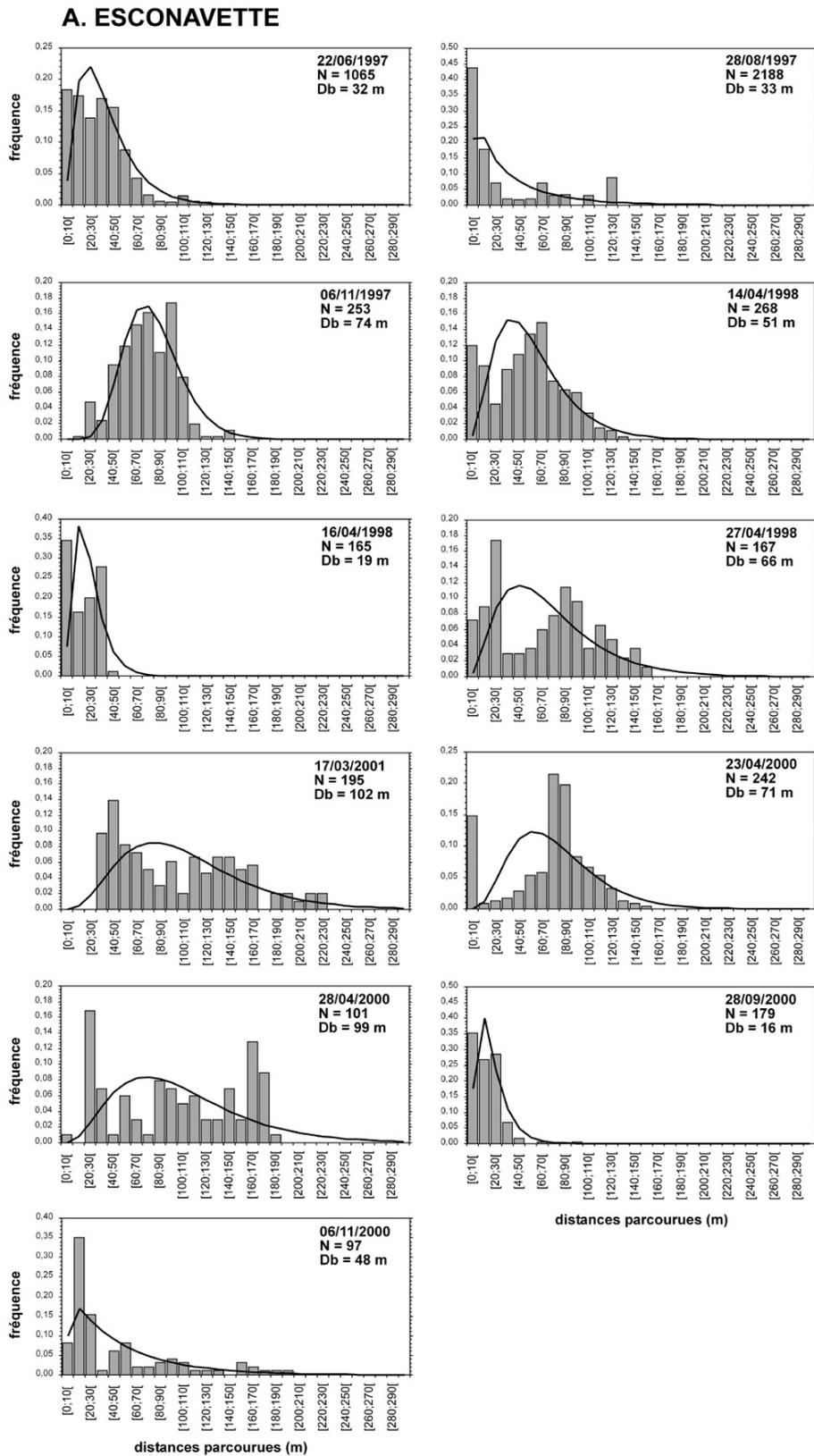
*Distributions granulométriques des traceurs qui se sont déplacés et qui ont été retrouvés lors des crues mesurées entre 1997 et 2001 sur la Barnavette, la Béoux et l'Esconavette*

végétaux étant peu présents sur les tronçons de diffusion, nous pouvons admettre que leur influence sur les distances parcourues est faible.

Si nous examinons les distributions événementielles, nous obtenons des configurations complexes (Fig. 147). Les histogrammes ont été comparés aux courbes d'ajustement gamma, généralement considérées comme les plus performantes pour décrire la distribution des distances de transport événementielles [Hassan *et al.*, 1991]. Ce traitement n'a été conduit que sur les crues pour lesquelles nous disposons d'un nombre d'observations supérieur à 80. Sur 23 événements étudiés, seulement 6 présentent des distributions visuellement proches des ajustements gamma. Ce sont les crues du 06/11/1997 et 06/11/2000 sur l'Esconavette, les crues du 31/05/1998 et du 09/05/2000 sur la Barnavette et celles du 10/06/1998 et du 04/03/1999 sur la Béoux. La plupart de ces événements présentent de faibles intensités ; les pics de crues sont généralement inférieurs à  $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Pour les autres crues, nous observons souvent des distributions plurimodales. On distingue la plupart du temps sur l'Esconavette des histogrammes à 2 ou 3 pics, centrés sur les intervalles 0-10, 20-40 et 70-90. Ces pics sont généralement espacés de 30 à 50 mètres. Cet intervalle est du même ordre de grandeur que l'espacement des bancs alternes observé sur le tronçon de diffusion des traceurs (Fig. 121 B). Sur la Barnavette, les distributions se caractérisent souvent par un pic très marqué sur les courtes distances (0-20 mètres) et un pic atténué sur les longues distances (80-150 mètres). La distance entre ces pics est de l'ordre de 100 mètres. Cet espacement est également à mettre en relation avec la distance qui sépare les 2 principales zones d'accumulations graveleuses rencontrées le long du tronçon de diffusion, qui est de 120 mètres. Les histogrammes obtenus sur la Béoux présentent des formes plus chaotiques, sans attributs particuliers. Ceci résulte probablement du faible nombre de traceurs retrouvés.

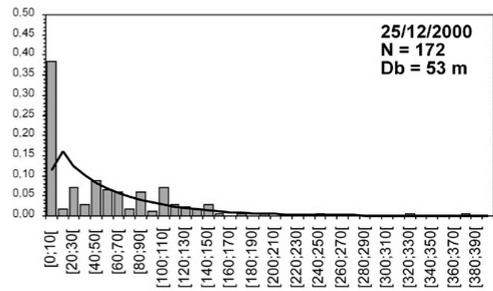
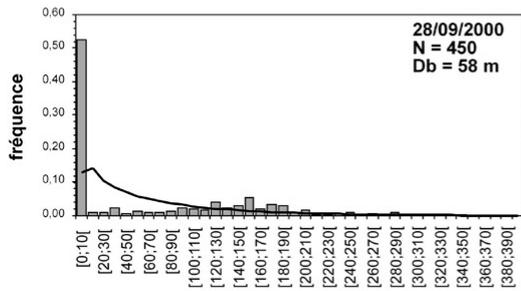
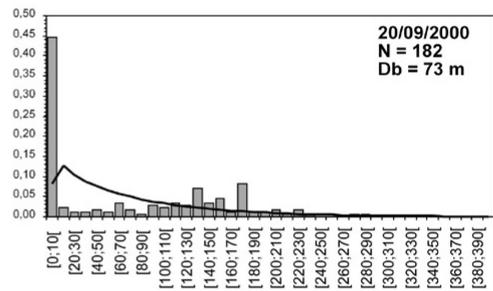
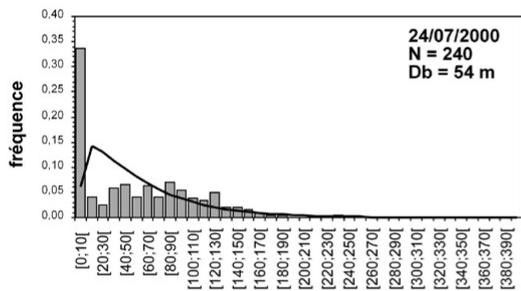
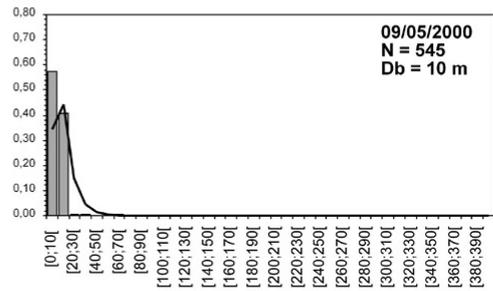
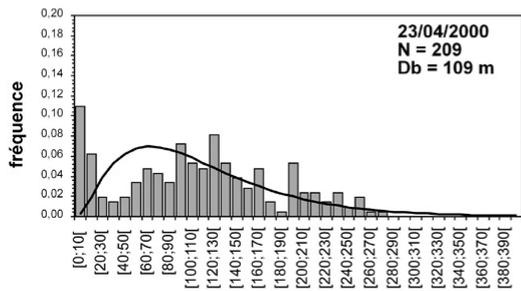
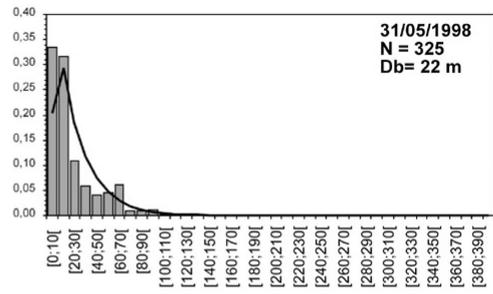
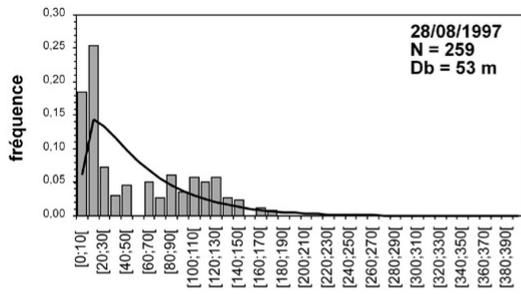
**Figure 147**

Distributions des distances parcourues par les particules retrouvées pour différentes crues ; Les courbes correspondent aux distributions gamma calculées à partir des moyennes et écart types ; N : nombre de traceurs retrouvés ; Db : distance moyenne parcourue ; A : Esconavette ; B : Barnavette ; C : Béoux

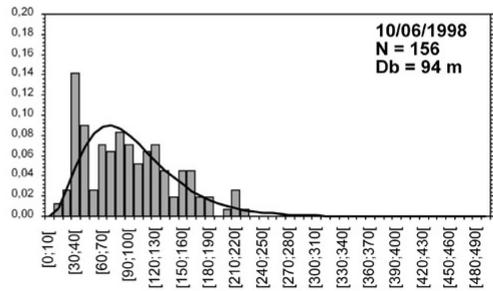
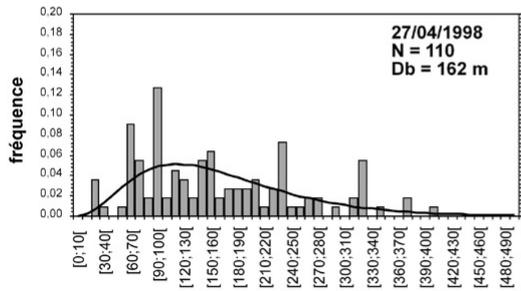


Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

**B. BARNAVETTE**



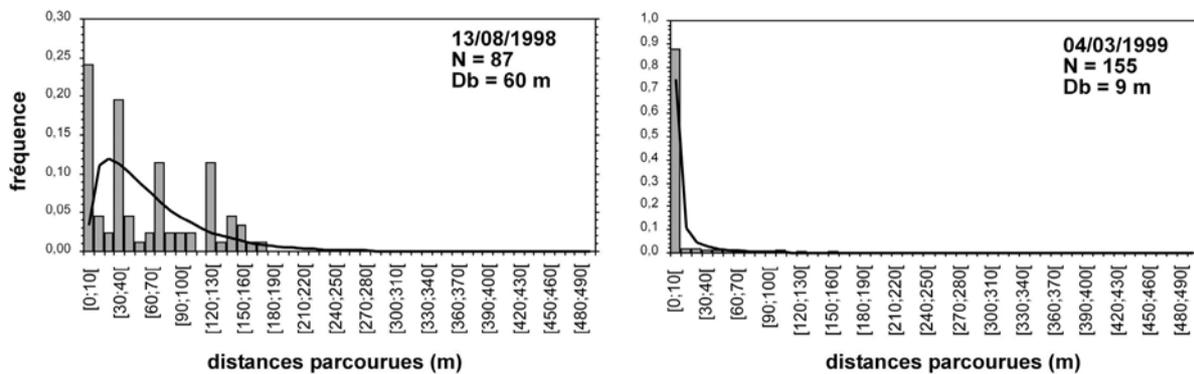
**C. BEOUX**



distances parcourues (m)

distances parcourues (m)

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond



Les distances événementielles moyennes de transport ont été mises en relation avec certains paramètres permettant de caractériser l'intensité des crues : (1) le débit en excès, obtenu en soustrayant le pic de crue et le débit critique de mise en mouvement de la charge de fond et (2) la puissance spécifique en excès, obtenue en soustrayant la puissance spécifique maximale atteinte pendant la crue et la puissance spécifique critique. Ces paramètres permettent d'établir des comparaisons avec les modèles existant dans la littérature [Hassan *et al.*, 1992 ; Gintz *et al.*, 1996]. Nous obtenons des nuages de points dispersés, qui donnent néanmoins des relations significatives à condition d'exclure les très faibles crues (Fig. 148 et 149). Les modèles proposés sont les suivants :

$$Db = 31,31Q - Q_0^{0,581}$$

$$R^2 = 0,203$$

$$p = 0,0271$$

$$n = 24$$

$$Db = 0,46 W - W_0^{1,256}$$

$$R^2 = 0,403$$

$$p = 0,0026$$

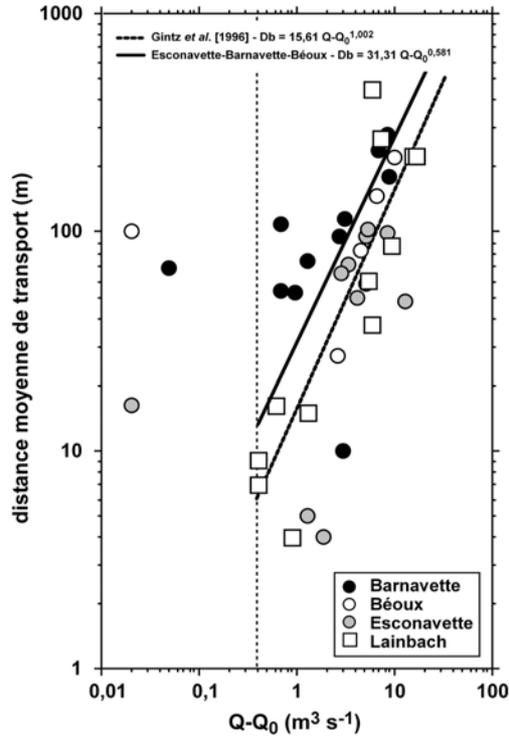
$$n = 21$$

avec,  $Db$  = distance moyenne de transport (en m)

$Q - Q_0$  = débit en excès (en  $m^3 s^{-1}$ )

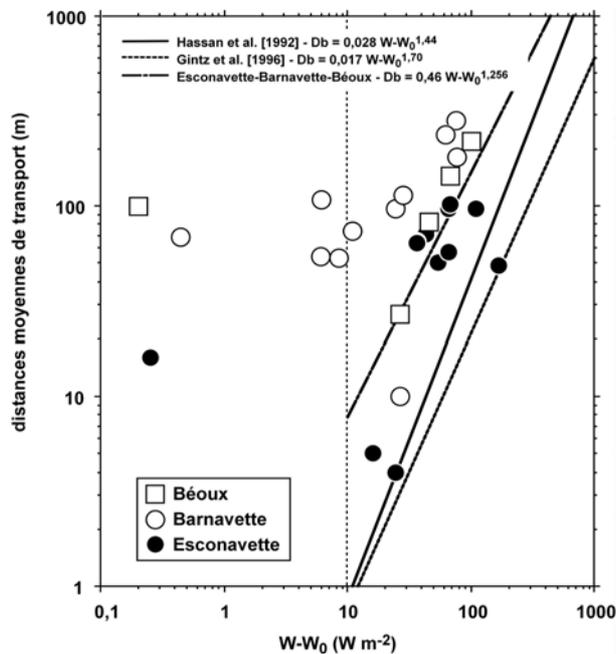
$W - W_0$  = puissance spécifique en excès (en  $W m^{-2}$ )

Nous observons que les crues les plus faibles présentent des distances moyennes nettement au-dessus des ordres de grandeur prévisibles d'après les modèles existants. En revanche, au-delà d'une certaine intensité de crue, nous obtenons des distances conformes aux prévisions. Plusieurs éléments d'explication peuvent être proposés. Certaines petites crues mesurées se caractérisent par des hydrogrammes à plusieurs pics. Ce fut le cas des événements du 30/09/2000 survenus sur l'Esconavette et la Barnavette et de la crue du 20/09/2000 sur la Bécoux (Tab. 40). Ces événements correspondent aux 3 points isolés de la figure 148. Il est donc probable que les particules aient été mises en mouvement à plusieurs reprises, ce qui contribue à surestimer les distances de transport.



**Figure 148**

Relation entre le débit en excès ( $Q-Q_0$ ) et la distance moyenne de transport ( $Db$ ) ; nous avons indiqué, à titre de comparaison, le modèle obtenu sur la rivière torrentielle Lainbach [Gintz et al., 1996] ; le modèle de régression proposé pour l'Esconavette, la Barnavette et la Béoux ne prend pas en compte les points situés en-deçà de  $0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$



**Figure 149**

Relation entre la puissance spécifique en excès au droit des stations sédimentologiques ( $W-W_0$ ) et la distance moyenne de transport ( $Db$ ) ; les modèles obtenus par Hassan et al. [1992] et Gintz et al. [1996] sont indiqués à titre de comparaison ; le modèle obtenu sur l'Esconavette, la Barnavette et la Béoux ne prend pas en compte les points situés en deçà de  $10 \text{ W m}^{-2}$

D'autre part, il est possible de penser que ces petites crues ne mobilisent que les particules à petit diamètre, dont la probabilité de parcourir de grandes distances est plus forte. Nous avons donc exclu ces événements dans les analyses de régression. Les modèles obtenus sur nos 3 cours d'eau donnent des distances de transport supérieures à celles observées par Hassan *et al.* [1992] et Gintz *et al.* [1996]. Ceci s'explique par le fait que ces auteurs incluent dans leurs modèles les particules qui ne se sont pas déplacées. Nous ne les avons pas prises en compte dans le calcul des distances moyennes car notre objectif final est d'obtenir une évaluation du volume de charge de fond déplacé pendant l'événement, hors ces particules ne participent pas au transport solide. Nous observons enfin que les points mesurés sur la Barnavette, et dans une moindre mesure sur la Béoux, sont généralement situés au-dessus des autres. Ceci est à rapprocher des considérations morphologiques présentées précédemment. La Barnavette présente un tronçon plus étroit, marqué par une quasi absence de bancs de graviers, au sein duquel les particules ont plus de chances de parcourir de grandes distances.

#### 4.2. Distances annuelles de transport

Les distances annuelles de transport ont été obtenues par cumul des distances événementielles sur la période 1997-2002. Pour les crues n'ayant pas fait l'objet d'un suivi par traçage colorimétrique, nous avons calculé les distances moyennes de transport à partir du débit en excès, conformément au modèle présenté précédemment. Nous obtenons ainsi des distances annuelles de charriage comprises entre 450 et 470 m an<sup>-1</sup> (Tab. 41 ; Fig. 150). Ces valeurs doivent être considérées comme légèrement sous-estimées dans la mesure où les relevés ont été commencés tardivement dans l'année en 1997 sur la Barnavette et la Béoux. Il est ainsi possible que quelques crues nous aient échappé sur ces deux cours d'eau. Les moyennes sont peu différentes d'un affluent à l'autre. En revanche, la variabilité interannuelle est forte. Les valeurs extrêmes sont de 105 et 1269 m an<sup>-1</sup>. Cette variabilité est sous le contrôle des précipitations annuelles qui oscillent fortement d'une année à l'autre. Nous avons observé des totaux annuels compris entre 725 et 1235 mm sur la période 2000-2002 (Tab. 42). Nous obtenons à ce propos une bonne relation entre la distance annuelle de charriage et les précipitations annuelles :

$$Dm = -1499 + 2,232 P \text{ (R}^2 = 0,80 \text{ ; } p = 0,0011 \text{ ; } n = 9)$$

*Avec Dm, la distance annuelle de transport de la charge de fond (en m an<sup>-1</sup>)*

*P, les précipitations annuelles (en mm)*

Il faut cependant émettre des réserves sur la validité de ce modèle dans la mesure où il n'est fondé que sur 3 années d'observations et 9 individus statistiques. Il est également important de considérer la répartition des pluies dans l'année pour conforter et généraliser ce type de régression empirique. Néanmoins, ces premiers résultats sont encourageants.

Les distances annuelles de charriage obtenues sur nos trois cours d'eau peuvent être comparées

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

aux valeurs prédites par la relation empirique proposée récemment par Beechie [2001] et fondée sur la largeur à pleins bords. Celle-ci peut être considérée comme un indicateur indirect du débit à pleins bords dont dépend la mobilité des sédiments. Cet auteur propose la relation suivante, fondée sur 16 rivières graveleuses de la côte ouest des Etats-Unis et de l'Ecosse :

$$Dm = -32 + 21 W_{pb}$$

Avec,  $Dm$  : la distance annuelle de transport de la charge de fond (en  $m \text{ an}^{-1}$ )

$W_{pb}$ , la largeur à pleins bords (en m)

Nous avons retenu la largeur de la bande active au droit des stations de suivi de la charge de fond pour effectuer les comparaisons. La projection de nos 3 cours d'eau sur le modèle de Beechie montre une bonne adéquation de nos résultats avec ses valeurs (Fig. 151). Ce modèle a été obtenu à partir d'une gamme de pentes comprise entre 0,0007 et 0,03  $m \text{ m}^{-1}$  et des superficies drainées comprises entre 8 et 523  $\text{km}^2$ . Nos sites d'étude entrent ainsi parfaitement dans ces intervalles.

**Tableau 41**

*Distances annuelles de transport de la charge de fond sur la période 1997-2002*

Cours d'eau	1997	1998	1999	2000	2001	2002	MOYENNE
Esconavette	201	657	356	801	388	380	<b>464</b>
Barnavette	371	105	499	1269	286	297	<b>471</b>
Béoux	201	657	356	801	388	278	<b>447</b>

**Tableau 42**

*Précipitations annuelles en mm sur la période 2000-2002*

Cours d'eau	2000	2001	2002	MOYENNE
Esconavette	1060	767	891	<b>906</b>
Barnavette	1088	725	833	<b>882</b>
Béoux	1250	896	895	<b>1014</b>

NB : l'année 2002 est incomplète (dysfonctionnement des pluviographes entre le 20/03 et le 30/04)

Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

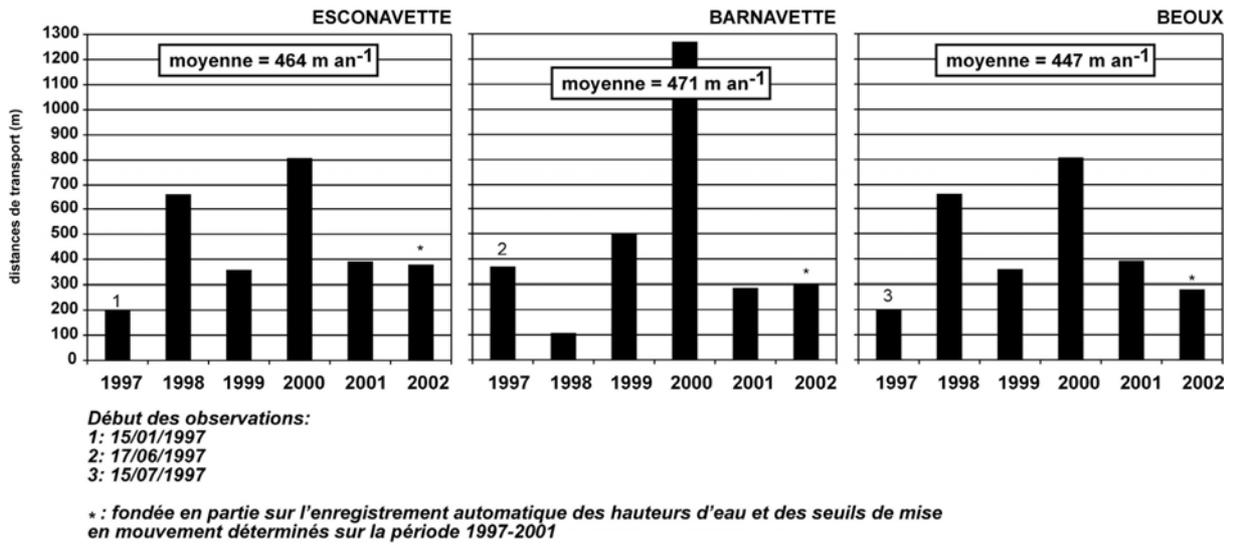


Figure 150 Distances annuelles de transport de la charge de fond mesurées sur la période 1997-2002

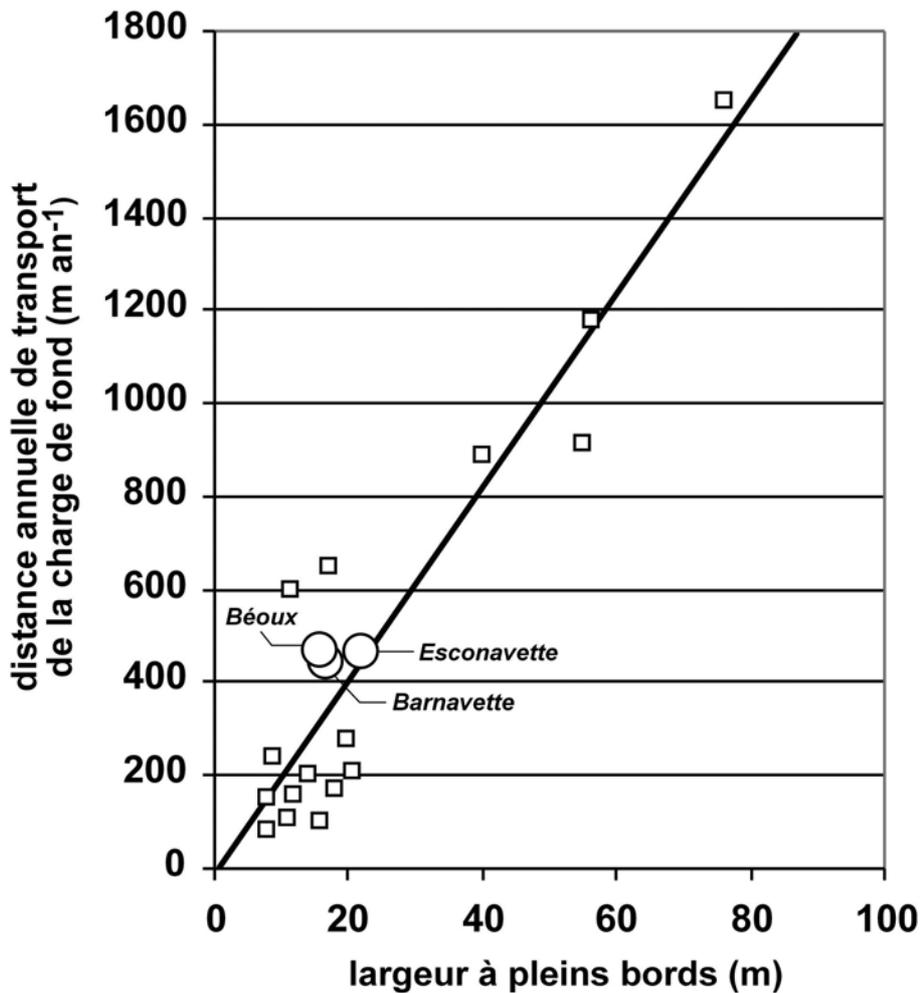


Figure 151 Position de l'Esconavette, de la Barnavette et de la Béoux sur le modèle bivarié de Beechie [2001] entre la largeur à pleins bords et la distance annuelle de transport de la charge de fond ; les données de Beechie sont représentées par les carrés blancs

### 4.3. Synthèse

Malgré le faible nombre de particules généralement retrouvées après les crues, qui constitue un problème inhérent aux méthodes colorimétriques [Hassan *et al.*, 1984], nous obtenons des résultats souvent conformes aux observations habituelles sur la mobilité des particules dans les rivières graveleuses. Les analyses événementielles révèlent de faibles liens entre le diamètre et la mobilité des particules. Seule la distance maximale observée est corrélée à la taille des traceurs, ce qui se traduit par des relations en courbe-enveloppe du même type que celles proposées par Laronne et Carson [1976], Hassan et Church [1992] ou Schmidt et Ergenzinger [1992]. Ceci est à mettre en relation avec la nature stochastique du déplacement des grains individuels et l'effet de piégeage des petites particules par les gros éléments présents dans le fond du lit [Hassan *et al.*, 1992]. Le fait que nos observations montrent bien une configuration en courbe-enveloppe nous permet d'affirmer que la gamme des diamètres de nos traceurs est bien représentative de la diversité granulométrique de la charge de fond en transit dans nos cours d'eau.

Les distributions événementielles des distances de transport sont généralement asymétriques avec un pic marqué vers les faibles distances, ce qui se modélise souvent par des ajustements de type gamma [Hassan *et al.*, 1991 ; Schmidt et Ergenzinger, 1992 ; Gintz *et al.*, 1996]. Ces fonctions, utilisées pour décrire des phénomènes aléatoires, fonctionnent bien pour rendre compte des distances parcourues lors des petites crues. Lorsque la mobilité des particules augmente, les distributions deviennent plus complexes et elles sont souvent contrôlées par la morphologie du lit [Kondolf et Matthews, 1986 ; Hassan *et al.*, 1991 ; Sear, 1996 ; Milan *et al.*, 2002 ; Pyrce et Ashmore, 2003]. Nos observations confirment ces conclusions, dans la mesure où la plupart des distributions obtenues montrent des configurations plurimodales contrôlées par la présence de zones d'accumulations graveleuses. Les quelques crues qui suivent des distributions de type gamma représentent bien des événements de faible intensité, à hydrogramme simple. Lorsque le pic de crue augmente, les particules se dispersent sur de plus grandes distances et elles se déposent préférentiellement dans les secteurs marqués par la présence de bancs de graviers. Nous observons également que les distances maximales parcourues lors d'une crue sont plus importantes sur la Barnavette et la Béoux que sur l'Esconavette. Ceci est à mettre en relation avec la présence de tronçons étroits, légèrement incisés, caractérisés par l'absence de bancs de graviers. Les particules se déplacent rapidement au sein de ces tronçons, ce qui confère au cours d'eau une plus grande transmissivité sédimentaire. Tous ces résultats sont fondés sur le décompte des particules qui sont restées en surface après le déplacement. Ils ne peuvent être généralisables qu'à condition de considérer une similitude de comportement avec les particules enterrées à l'issue d'une crue, dont la prise en compte nécessite l'usage du traçage magnétique. Cette hypothèse a été validée par Hassan [1990] qui observe des distances de transport similaires entre les particules enterrées et restées en surface, à l'issue d'une étude de traçage magnétique conduite sur des rivières graveleuses semi arides.

L'exploration des liens entre les distances moyennes de charriage et l'intensité des crues donne des

résultats relativement proches des modèles proposés par Hassan *et al.* [1992] et Gintz *et al.* [1996], à condition d'exclure les crues les plus faibles. Nous justifions cette simplification par le fait que ces événements n'auraient mobilisé que les particules les plus petites et que les distances moyennes obtenues sont probablement surestimées. Nous obtenons néanmoins, pour une intensité donnée, des distances moyennes supérieures par rapport à celles proposées par ces auteurs. Ceci s'explique par le fait que ces relations prennent en compte les particules qui sont restées immobiles pendant la crue. Il faut également mentionner le fait que pour une même intensité de crue, la Barnavette et la Béoux présentent des distances moyennes de transport supérieures par rapport à l'Esconavette. Ceci est à mettre en relation avec la morphologie du lit, caractérisée par l'absence de bancs de graviers et par la prédominance des tronçons étroits à forte transmissivité sédimentaire.

Le cumul des parcours événementielles nous donne des distances annuelles de charriage comprises entre 450 et 470 m an<sup>-1</sup>. La comparaison des 3 affluents montre à nouveau une légère supériorité de la Barnavette, d'autant plus que les précipitations y ont été plus faibles sur la période d'observation. Ceci confirme à nouveau des transferts sédimentaires internes plus rapides en relation avec un lit plus étroit. Cette observation est en contradiction avec les travaux de Beechie [2001] qui démontrent que les distances annuelles de transport augmentent proportionnellement à la largeur à pleins bords. L'auteur considère cette relation empirique comme la résultante d'un contrôle morphologique sur les distances parcourues par les particules. Il existe en effet une loi de proportionnalité entre la largeur du lit et l'espacement entre les bancs [Leopold *et al.*, 1964]. Cet équilibre morphologique résulte de la dynamique du transfert des sédiments dans le chenal, dans la mesure où les particules ont tendance à se déplacer d'un banc à l'autre. Il existe donc une relation indirecte entre les distances annuelles de transit et la largeur du cours d'eau. D'autre part, ces distances sont également contrôlées par l'intensité et la fréquence des crues qui se produisent dans l'année. Or, la largeur du lit est également ajustée à ces écoulements morphogènes. Nous devons cependant admettre que ces relations ne peuvent se concevoir qu'à condition de considérer des rivières bien différenciées en terme de taille de bassin versant. Nos trois affluents présentent de toutes évidences des dimensions trop proches pour permettre une validation de ce principe de proportionnalité entre la largeur du lit et la mobilité des particules. Nous devons considérer qu'à tailles égales, le style morphologique des tronçons constitue le principal facteur de contrôle sur les distances parcourues.

**Troisième Partie: Le transport de la charge de fond**

## 5. Les volumes charriés

### 5.1. Approche événementielle

Le suivi des distances de transport et des sections solides mobilisées nous permettent de calculer les volumes charriés sur la période 1997-2002. Nous disposons d'un ensemble de 93 crues documentées en terme de charge de fond transportée (Tab. 43). Les volumes présentés dans ce tableau prennent en compte la porosité du sédiment, estimée à partir de la formule de Carling et Reader [1982], conformément aux procédures recommandées par Haschenburger et Church [1998]. Cette formule se présente sous la forme suivante :

$$p = 0,4665 Dm^{-0,21} - 0,0333$$

*Avec p, la porosité*

*Dm, le diamètre moyen des particules*

Le diamètre moyen que nous avons considéré pour appliquer cette formule est celui calculé à partir des distributions granulométriques des traceurs retrouvés (Fig. 146), jugé plus représentatif de la charge de fond par rapport à celui obtenu à partir des échantillonnages surfaciques effectués sur les bancs de graviers.

Certaines des crues survenues sur la période d'observation n'ont pas fait l'objet d'une mesure des distances de transport par manque de temps. Il arrive en effet que les crues se succèdent sur de courtes périodes, ce qui rend les relevés difficiles. Nous avons donc calculé ici les distances moyennes à partir de la relation obtenue avec le débit en excès (Fig. 148). Si nous considérons les crues survenues après juillet 1999 (début du suivi hydrologique) et pour lesquelles nous disposons de relevés complets, il est possible de mettre en relation l'intensité de la crue avec le volume de charge de fond transporté. Le débit maximum atteint pendant l'événement procure les meilleurs résultats (Fig. 152, 153 et 154). Si nous prenons en compte l'ensemble des crues, nous obtenons les modèles empiriques suivants :

$$Vb = 3,82 Q_{max}^{1,758} \quad (R^2 = 0,562 ; p < 0,0001)$$

$$Vb = 0,25 \omega_s^{1,389} \quad (R^2 = 0,428 ; p = 0,0003)$$

$$Vb = 0,0006 \tau^{2,515} \quad (R^2 = 0,19 ; p = 0,0269)$$

*Avec Vb, le volume de charge de fond transporté (en m<sup>3</sup>)*

*Q<sub>max</sub>, le pic de crue en m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>*

*ω<sub>s</sub>, la puissance spécifique maximale en W m<sup>-2</sup>*

*τ, la force tractrice maximale en N m<sup>-2</sup>*

Nous avons tenté d'améliorer ces relations en prenant en compte la durée de la crue. La relation entre le débit maximum multiplié par la durée de l'événement et le volume charrié donne des résultats moins significatifs que celle établie à partir du pic de crue ( $R^2 = 0,48$ ). En revanche, les relations établies en séparant la Barnavette du groupe Esconavette-Béoux donnent de meilleurs résultats.

**Tableau 43**  
*Charge de fond transportée sur la période 1997-2002*

Cours d'eau	Date de la crue	Qmax (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Ab (m <sup>2</sup> )	Db (m)	Vb (m <sup>3</sup> )
Barnavette	04/07/1997	6,61	2,74	27	58
Barnavette	10/07/1997	7,07	3,58	57	160
Barnavette	28/08/1997	7,50	0,89	53	37
Barnavette	06/11/1997	4,82	1,66	117	153
Barnavette	19/12/1997	13,23	2,26	117	207
Barnavette	07/04/1998	7,01	1,21	83*	79
Barnavette	31/05/1998	3,85	0,99	22	17
Barnavette	28/01/1999	2,71	0,45	75	26
Barnavette	04/03/1999	2,04	1,03	146	118
Barnavette	26/03/1999	3,94	0,17	51*	7
Barnavette	03/10/1999	3,64	0,65	47*	24
Barnavette	21/10/1999	10,32	4,45	179	624
Barnavette	18/02/2000	1,65	0,49	5*	2
Barnavette	17/04/2000	4,37	1,25	96	94
Barnavette	23/04/2000	2,28	0,40	108	34
Barnavette	28/04/2000	8,50	2,87	237	533
Barnavette	10/05/2000	4,56	0,92	10	7
Barnavette	24/07/2000	2,28	0,47	54	20
Barnavette	20/09/2000	2,86	0,59	73	34
Barnavette	30/09/2000	1,65	0,34	68	18
Barnavette	13/10/2000	8,01	1,17	75*	69
Barnavette	06/11/2000	14,41	3,20	138*	345
Barnavette	14/11/2000	4,19	1,63	54*	69
Barnavette	23/11/2000	10,05	2,52	280	553
Barnavette	25/12/2000	2,56	1,45	53	60
Barnavette	08/03/2001	4,75	1,81	114	162
Barnavette	12/03/2001	4,19	1,66	54*	71
Barnavette	17/03/2001	5,14	0,80	65*	41
Barnavette	02/05/2001	4,01	1,23	52*	50
Barnavette	16/11/2002	17,15	4,09	154*	494
Béoux	28/08/1997	5,71	2,39	87	169
Béoux	06/11/1997	1,26	0,63	114	58
Béoux	02/01/1998	3,92	0,29	96	23
Béoux	07/04/1998	6,13	0,36	138	40
Béoux	27/04/1998	0,76	0,31	162	41
Béoux	10/06/1998	4,98	0,13	94	10
Béoux	13/08/1998	1,10	0,25	60	12
Béoux	13/09/1998	0,53	0,19	108	17
Béoux	28/01/1999	4,70	0,85	108	74
Béoux	04/03/1999	NR	0,09	9	1
Béoux	07/05/1999	1,63	0,62	127	64
Béoux	19/09/1999	7,61	1,37	82	91
Béoux	21/10/1999	4,06	0,75	31*	19
Béoux	19/02/2000	5,70	0,63	27	14
Béoux	17/04/2000	13,02	1,36	219	242
Béoux	28/04/2000	10,15	1,55	97*	123

## Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

Tableau 43 (suite)

Cours d'eau	Date de la crue	Qmax (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Ab (m <sup>2</sup> )	Db (m)	Vb (m <sup>3</sup> )
Béoux	24/07/2000	5,40	1,43	51*	59
Béoux	20/09/2000	3,12	1,10	100	90
Béoux	28/09/2000	3,12	0,15	3*	0
Béoux	13/10/2000	11,34	2,27	107*	197
Béoux	06/11/2000	11,75	2,75	110*	246
Béoux	23/11/2000	9,02	1,56	88*	112
Béoux	08/03/2001	13,02	2,58	119*	249
Béoux	17/03/2001	8,66	2,41	85*	166
Béoux	02/05/2001	9,77	1,66	145	196
Béoux	06/10/2001	4,57	2,48	39*	79
Béoux	28/07/2002	7,27	3,68	72*	215
Béoux	16/11/2002	9,02	6,82	88*	488
Esconavette	16/05/1997	NR	NR	NR	39**
Esconavette	22/06/1997	NR	0,53	32	14
Esconavette	03/07/1997	3,51	2,72	30	65
Esconavette	28/08/1997	7,58	3,36	33	89
Esconavette	06/11/1997	1,64	0,81	74	48
Esconavette	19/12/1997	5,35	1,65	68*	90
Esconavette	02/01/1998	4,23	1,13	56*	50
Esconavette	19/01/1998	2,76	0,51	6	2
Esconavette	07/04/1998	1,51	0,22	19	3
Esconavette	14/04/1998	5,08	1,77	51	72
Esconavette	27/04/1998	7,01	1,26	66	66
Esconavette	17/01/1999	2,57	0,35	32*	9
Esconavette	28/01/1999	11,18	2,35	66	124
Esconavette	21/04/1999	2,37	2,17	28*	48
Esconavette	03/10/1999	2,81	0,00	5	5
Esconavette	21/10/1999	14,46	5,25	138*	581
Esconavette	17/04/2000	9,06	2,83	101*	228
Esconavette	24/04/2000	4,95	0,91	71	52
Esconavette	28/04/2000	10,11	4,11	99	325
Esconavette	15/06/2000	3,64	0,82	48*	31
Esconavette	24/07/2000	6,43	1,70	79*	107
Esconavette	30/09/2000	1,57	0,35	16	4
Esconavette	14/10/2000	6,65	1,52	96	117
Esconavette	06/11/2000	14,46	1,88	253	381
Esconavette	14/11/2000	4,36	0,68	65	35
Esconavette	23/11/2000	17,36	2,93	156*	365
Esconavette	25/12/2000	3,81	0,55	50*	22
Esconavette	08/03/2001	6,65	1,46	58	68
Esconavette	12/03/2001	7,58	1,14	89*	81
Esconavette	17/03/2001	6,88	1,57	102	128
Esconavette	08/04/2001	3,46	0,90	4	3
Esconavette	02/05/2001	5,99	2,28	74*	136
Esconavette	25/09/2001	5,77	1,08	50	43
Esconavette	07/10/2001	3,46	1,13	46*	41
Esconavette	16/11/2002	9,32	1,24	103*	102

NR : non renseigné

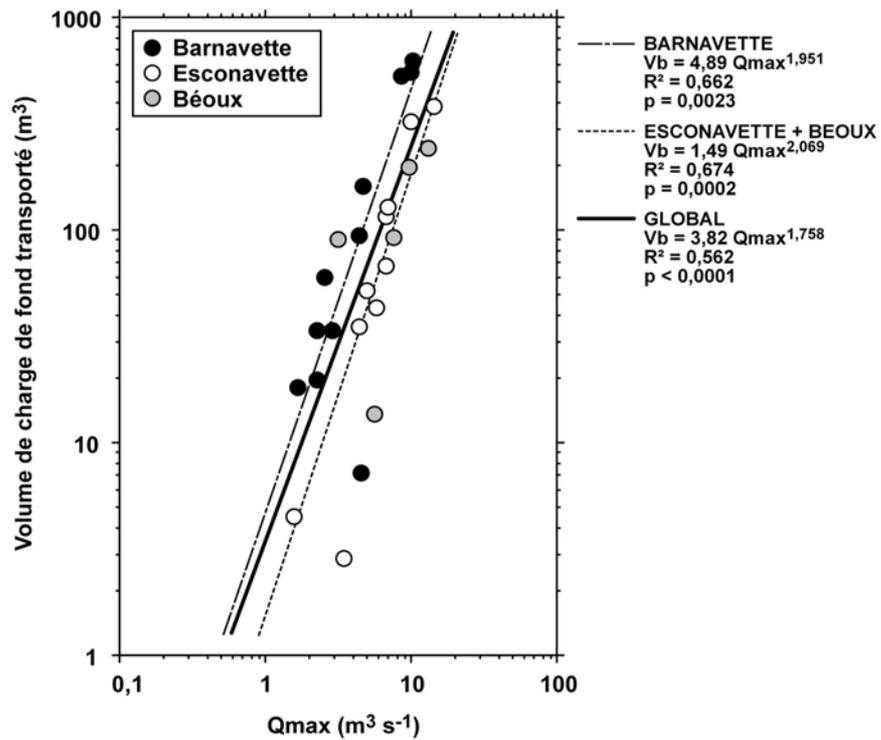
Qmax : pic de crue en m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>

Ab : section solide mobilisée (d'après les chaînes d'érosion)

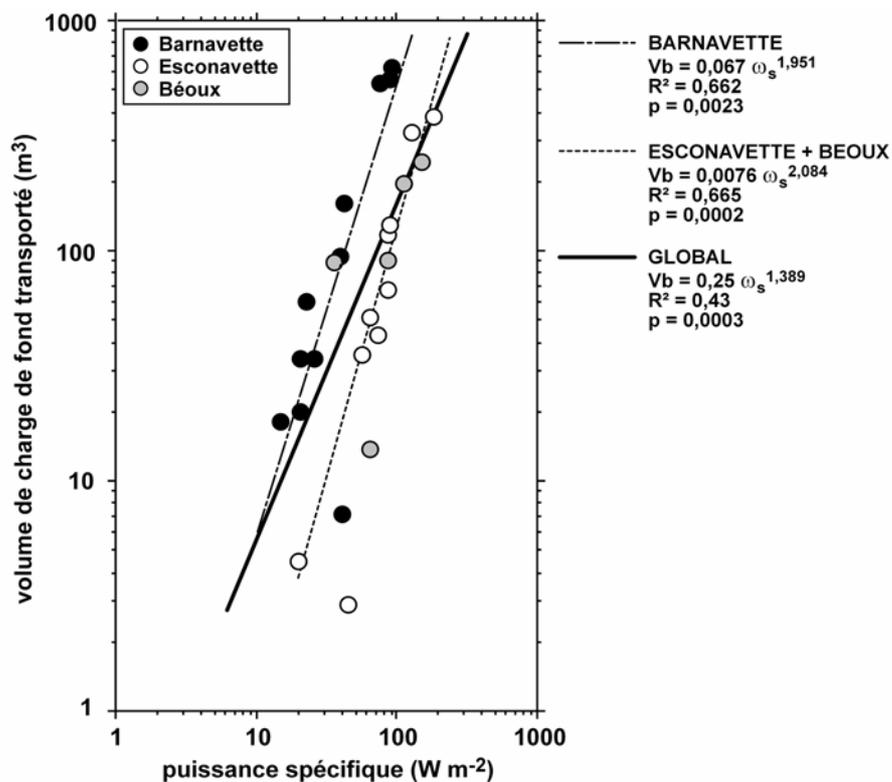
Db : distance moyenne parcourue par les sédiments (d'après les traceurs)

\* d'après la relation  $Db = 31,31Q - Q_0^{0,581}$ 

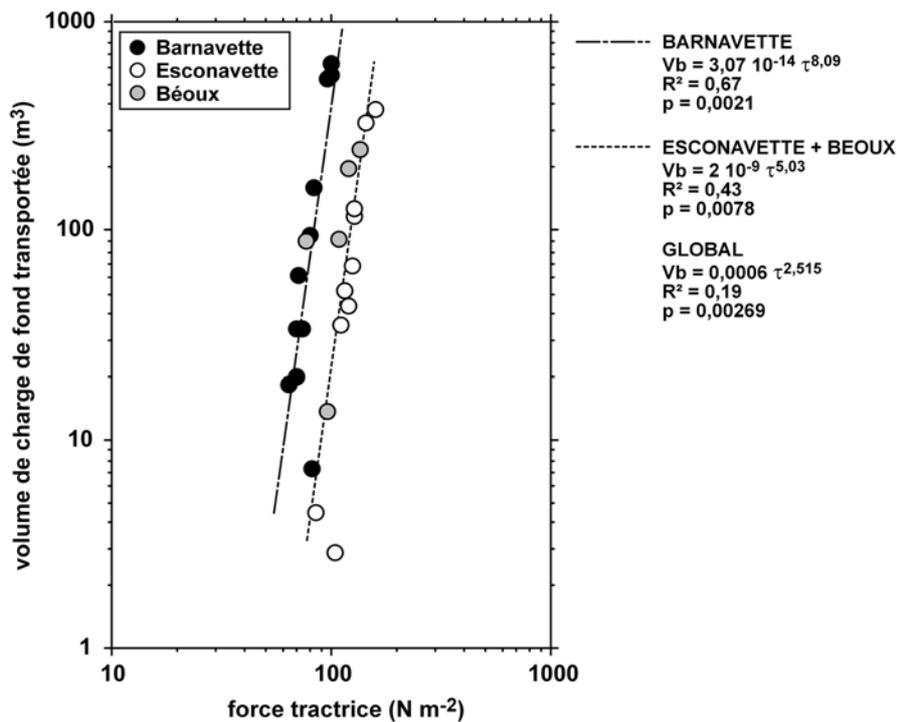
\*\* d'après le remplissage d'une fosse d'extraction (cf. paragraphe 213)



**Figure 152**  
Relation entre le pic de crue ( $Q_{max}$  en  $m^3 s^{-1}$ ) et le volume de charge de fond transporté ( $V_b$  en  $m^3$ )



**Figure 153**  
Relation entre la puissance spécifique maximale atteinte pendant la crue au droit des stations sédimentologiques ( $\omega_s$  en  $W m^{-2}$ ) et le volume de charge de fond transporté ( $V_b$  en  $m^3$ )



**Figure 154**

Relation entre la force tractrice maximale atteinte pendant la crue au droit des stations sédimentologiques ( $\tau$  en  $N m^{-2}$ ) et le volume de charge de fond transporté ( $V_b$  en  $m^3$ )

La configuration des nuages de points montre clairement que pour une même intensité de crue, les volumes charriés sont supérieurs sur la Barnavette. Ceci est particulièrement visible si nous considérons les puissances spécifiques et les forces tractrices, car la pente du lit y est plus faible que sur les 2 autres affluents (Fig. 153 et 154). Nous retrouvons ici l'influence des distances de transport sur le calcul du charriage. Les analyses antérieures ont montré que pour un même débit, la Barnavette véhicule ses sédiments sur de plus grandes distances. D'autre part, la mobilité topographique du lit y est également plus forte. Cette supériorité doit cependant être nuancée compte tenu de la marge d'erreur de notre technique de mesure qui peut être estimée à +/- 13%.

## 5.2. Charriages annuels

Le cumul des charriages événementiels nous donne les volumes de charge de fond transportés annuellement sur nos trois affluents (Tab. 44 ; Fig. 155). Nous obtenons des valeurs moyennes comprises entre 500 et 800 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup> sur la période 1997-2002. Il faut néanmoins signaler que l'année 1997 est incomplète sur la Barnavette et la Béoux, car les relevés ont commencés plus tardivement. Le total annuel est donc légèrement sous-estimé pour ces deux valeurs. Il faut également signaler que le transport solide de la quasi-totalité des crues de l'année 2002 a été calculé à partir de la relation entre le pic de crue et le charriage (Fig. 152). Les chiffres proposés traduisent donc ici la chronique des débits maximums survenus pendant l'année.

Ces résultats sont-ils représentatifs des conditions climatiques moyennes ? Si nous considérons les précipitations annuelles observées sur la période 1997-2002 aux postes météorologiques les plus proches de notre zone d'étude et si nous les comparons avec les moyennes sur la période 1965-2002, nous obtenons des rapports compris entre 109 et 115% (Tab. 45). La période d'observation du transport solide a donc été légèrement plus humide que la normale, ce qui suggère une probable surestimation des charriages. Il serait cependant plus prudent d'établir une comparaison sur la base du nombre d'averses supérieures au seuil de déclenchement des crues, mais cette information nécessite l'achat de données et la mise en œuvre de traitements relativement longs.

La comparaison des charriages annuels bruts entre les 3 affluents montre un transport solide supérieur pour la Barnavette. Néanmoins, si nous tenons compte de la marge d'erreur de notre technique de mesure (13%), nous obtenons des intervalles de confiance qui se chevauchent entre les 3 cours d'eau (Tab. 44). Il est donc délicat de fonder une comparaison des charriages annuels compte tenu de la résolution de nos mesures. Nous devons considérer que nos trois affluents déplacent annuellement la même quantité de charge de fond et celle-ci est comprise entre 500 et 800 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>.

La pondération des charriages annuels par les superficies drainées donnent les valeurs respectives suivantes pour l'Esconavette, la Barnavette et la Béoux : 67, 51 et 20 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. Si nous comparons ces chiffres avec les charriages spécifiques communément mesurés dans les petites rivières torrentielles des montagnes méditerranéennes, qui sont compris entre 15 et 280 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> (Tab. 5, en admettant une densité de 2,65 t m<sup>-3</sup>), nous nous situons dans des ordres de grandeur plutôt intermédiaires. Il faut signaler que cette fourchette de valeurs comprend des organismes torrentiels déstabilisés par une déforestation massive des versants [Lacks Creek, Coyotte Creek et Redwood Creek ; Madej, 1995], ce qui explique les très fortes valeurs de transport solide publiées.

Il est également intéressant de confronter les charriages annuels obtenus avec les superficies drainées et d'intégrer dans l'analyse les quelques valeurs déjà publiées dans la Drôme. Une étude récente du budget sédimentaire de la Haute-Drôme, fondée sur la période 1928-2002, a donné le résultat suivant : 3500 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup> pour une superficie de 93 km<sup>2</sup>, soit un charriage spécifique de 38 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> [Piégay *et al.*, sous presse]. Landon [1999] et Landon *et al.* [1999] donnent respectivement

**Tableau 44**Volumes annuels de charge de fond sur la période 1997-2002 (en m<sup>3</sup>)

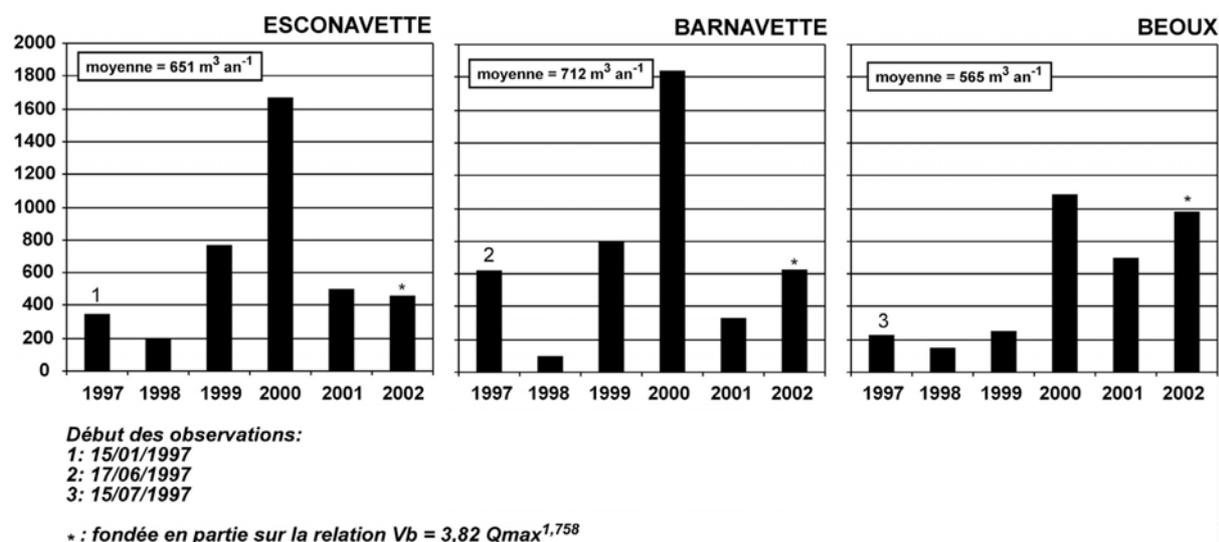
Cours d'eau	1997	1998	1999	2000	2001	2002	MOYENNE*
Esconavette	344	195	766	1667	500	435	<b>651 [565-735]</b>
Barnavette	614	96	799	1838	324	603	<b>712 [620-805]</b>
Béoux	227	143	249	1082	691	997	<b>565 [490-640]</b>

\*les valeurs entre parenthèses correspondent aux intervalles de confiance fondés sur une marge d'erreur de 13%

**Tableau 45**

Précipitations annuelles en mm sur la période 1997-2002 aux principaux postes météorologiques du Diois et comparaison avec les normales climatiques sur la période 1965-2002 (source : Météo-France)

Stations	Moyenne 1997-2002	Moyenne 1965-2002
Châtillon-en-Diois	1074	957
Die	1031	943
Glandage	1192	1040
Luc-en-Diois	1035	918
Valdrôme	1115	1019

**Figure 155**

Volumes de charge de fond transportés annuellement sur la période 1997-2002

pour les bassins versants de la Drôme et de l'Eygues une charge de fond annuelle de 30 000 et 66 000 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup> (charriages spécifiques respectifs de 20 et 60 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>). Enfin, le cubage des déstockages sédimentaires enregistrés par la morphologie du Haut-Roubion et de 2 de ses affluents, la Bine et le Soubriou, donnent des charriages spécifiques annuels compris entre 7 et 32 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> [Liébault et Piégay, 2001]. Bien que ces volumes pondérés aient été obtenus sur des échelles de temps et à partir de méthodes différentes, ils permettent d'obtenir une relation empirique de bonne qualité (Fig. 156), dont l'équation est la suivante :

$$Vb = 25,03 Ad^{0,989} \quad (R^2 = 0,825; p = 0,0007, n = 9)$$

Avec  $Vb$ , le charriage annuel en m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>

$Ad$ , la superficie drainée en km<sup>2</sup>

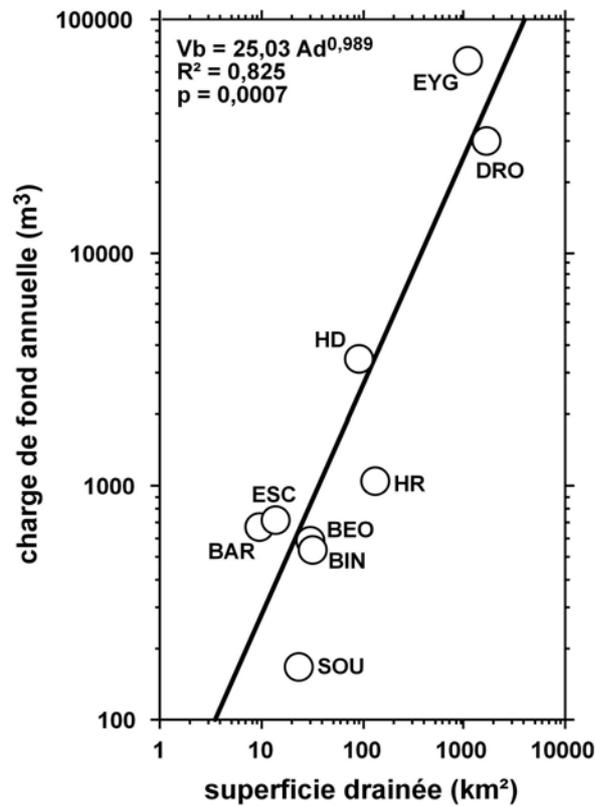
La position de l'Esconavette et de la Barnavette par rapport à ce modèle montre qu'ils peuvent être considérés comme des systèmes productifs et efficaces en terme de recharge en éléments grossiers. Inversement, la Béoux, compte tenu de la surface de son bassin, doit être considérée comme peu productive. Ces observations se confirment si nous pondérons le charriage annuel par la superficie des sources sédimentaires déterminée à partir des cartes géomorphologiques (Fig. 116, 117 et 118). Nous obtenons les résultats suivants : Esconavette : 824 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, Barnavette : 734 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, Béoux : 355 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. Si nous faisons l'hypothèse que les taux d'érosion qui affectent les sources sédimentaires des 3 affluents sont similaires, et rien ne nous permet de démontrer le contraire compte tenu des ressemblances physiques des bassins, nous devons admettre que les différences en terme de bilans mesurés à l'exutoire résultent de mécanismes de transferts sédimentaires internes distincts. Nous pouvons à ce titre identifier 2 éléments fondamentaux qui permettraient d'expliquer la supériorité des charriages spécifiques sur l'Esconavette : (1) la pente du fond de vallée est nettement supérieure, ce qui implique des transferts sédimentaires plus efficaces entre les bassins de réception et l'exutoire (Fig. 157) ; (2) les sédiments circulent librement dans les têtes de bassin, contrairement aux 2 autres affluents où d'importants ouvrages de correction torrentielle ont été construits à partir des années 1960 (Fig. 119). Si nous admettons un charriage pondéré de 820 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> (valeur obtenue sur l'Esconavette d'après la surface occupée par les sources sédimentaires) comme étant représentatif de transferts sédimentaires non perturbés, nous pouvons évaluer l'effet régulateur des ouvrages RTM sur le transport de charge de fond actuel de la Barnavette et de la Béoux. Nous obtenons des charriages de 795 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup> pour la Barnavette, valeur proche des volumes effectivement transportés, et de 1300 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup> pour la Béoux. Ce chiffre suggère que la Béoux n'exporterait que 40 % des sédiments grossiers que son bassin est capable de produire et de transmettre vers l'exutoire, le reste étant piégé par le dispositif de correction torrentielle.

Nous pouvons également tenter une comparaison des charriages annuels avec le transport de la charge en suspension. Celui-ci peut être reconstitué à partir des surfaces ravinées, connectées au réseau hydrographique, dont l'emprise spatiale a été cartographiée sur chaque bassin (Fig. 116, 117 et 118). Si nous appliquons à ces surfaces les taux d'ablation connus dans la région, il est possible

de calculer le volume de sédiments fins exporté annuellement par ces 3 rivières. Les vitesses d'érosion qui affectent les marnes noires ont été quantifiées sur de nombreux sites dans les Alpes du Sud et on admet aujourd'hui une valeur moyenne de  $1 \text{ cm an}^{-1}$  [Lecompte *et al.*, 1996 ; Descroix, 1998 ; Mathys *et al.*, 2003]. Les travaux de Descroix [1994, 1998] donnent un taux d'ablation sur marno-calcaire de  $0,32 \text{ cm an}^{-1}$ . Ce résultat a été obtenu à la Vière de Glandage (Haut-Diois, bassin du Bez), sur des marno-calcaires du Bédoulien en exposition nord. La comparaison des taux d'ablation sur marnes en fonction de l'exposition a révélé une érosion plus forte sur les versants nord ; cette différence est expliquée principalement par le fait que les altérites restent humides plus longtemps en ubac [Descroix, 1998]. Des résultats similaires ont été obtenus dans les Baronnies (bassin de la Méouge) où les taux d'ablation maximal et moyen sur marno-calcaires sont respectivement de  $0,30$  et  $0,15 \text{ cm an}^{-1}$ . Nous avons adopté une ablation de  $0,15 \text{ cm an}^{-1}$  pour caractériser l'ensemble des ravinements sur alternances calcaréo-marneuses, valeur plus représentative des conditions moyennes d'érosion sur nos 3 bassins versants. Pour valider la démarche, nous devons admettre que la totalité de la tranche de terrains érodés sur marno-calcaires ne produit que des sédiments fins à l'exutoire. Ceci paraît vraisemblable compte tenu (1) de la faible résistance des calcaires marneux qui représentent généralement les couches dures des affleurements en alternance et (2) des fortes conditions d'abrasion inhérentes aux rivières de montagne.

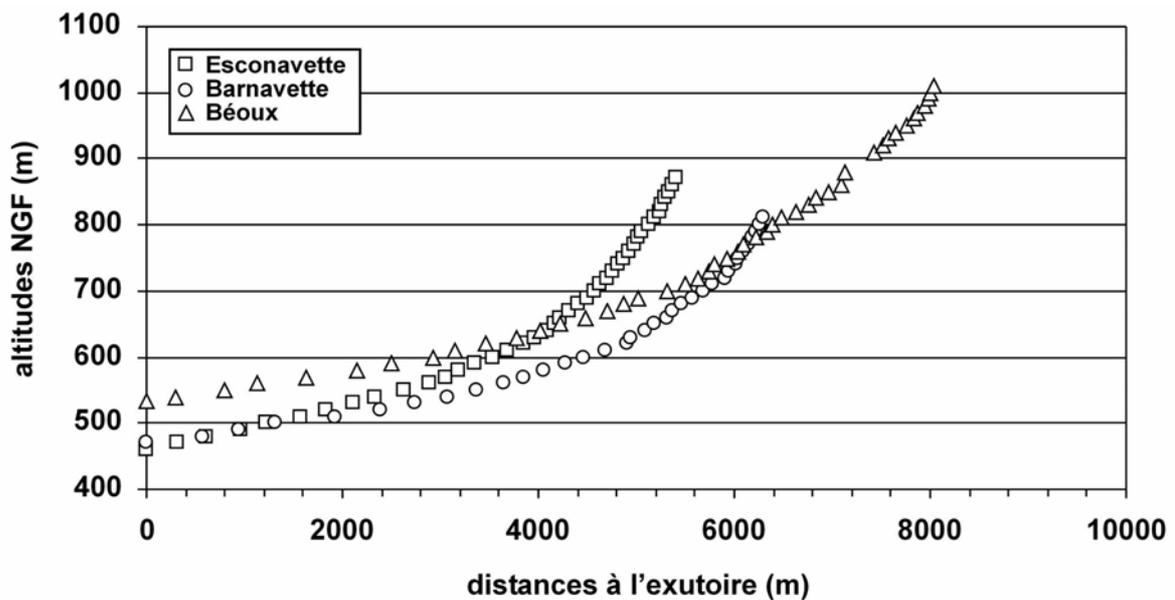
Les ravinements actifs de chaque bassin ont été classés en fonction de leur lithologie dominante, d'après les cartes géologiques, de façon à leur attribuer un taux d'ablation adéquat. Les résultats obtenus donnent un transport solide total de  $4995 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$  sur l'Esconavette,  $4286 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$  sur la Barnavette et  $8029 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$  sur la Béoux (cumul de la charge en suspension reconstruite d'après les surfaces ravinées et de la charge de fond annuelle mesurée sur la période 1997-2002). La part occupée par la charge de fond dans le transport solide total est donc respectivement de 11%, 14% et 7% si nous considérons les charriages mesurés sur la période 1997-2002 (Tab. 44).

Ces chiffres doivent être considérés comme des approximations basses dans la mesure où toutes les sources de sédiments fins n'ont pas été prises en compte dans les calculs. Il est possible qu'une part non négligeable de la charge en suspension provienne des sapements de berges qui se produisent au détriment des accumulations sédimentaires à matrice fine. Nous devons cependant relativiser l'importance des apports latéraux compte tenu de la dynamique de rétraction des bandes actives qui caractérise ces cours d'eau. D'autre part, les reconnaissances de terrain confirment que l'érosion des berges reste un phénomène très ponctuel le long des affluents. Nous devons également préciser que les ravinements sur formations superficielles sont peu présents dans les 3 bassins d'étude.



**Figure 156**

Relation entre le charriage annuel et la superficie drainée pour quelques bassins versants des Préalpes drômoises ; BAR : la Barnavette, BEO : la Béoux, BIN : la Bine, DRO : la Drôme à l'exutoire, ESC : l'Esconavette, EYG : l'Eygues à l'exutoire ; HD : la Haute-Drôme dans la plaine de Beaurières, HR : le Haut-Roubion à Bourdeaux, SOU : le Soubriou



**Figure 157**

Profils en long de l'Esconavette, de la Barnavette et de la Béoux d'après les cartes topographiques au 1 :25 000<sup>ème</sup>

### 5.3. Synthèse

L'analyse événementielle du charriage a permis de mettre en évidence une relation de proportionnalité entre le volume de charge de fond transporté et le débit maximum atteint pendant la crue. Bien que le lien paraisse évident, il existe peu de travaux de recherche permettant de valider ce type de relation. Les modèles empiriques existant entre la charge de fond et les paramètres hydrauliques ont presque tous été établis pour des échelles de temps instantanées [Adenlof et Wohl, 1994 ; Reid *et al.*, 1997 ; D'Agostino et Lenzi, 1999 ; Garcia *et al.*, 2000 ; Habersack et Laronne, 2001 pour les travaux les plus récents]. On cherche généralement à prédire le débit solide à partir de la puissance hydraulique, de la force tractrice ou du débit instantanés, mais rares sont les travaux qui ont tenté d'établir un lien à l'échelle de l'événement de crue. Nous pouvons néanmoins faire référence à Rickenmann [1997] qui propose un modèle événementiel sur un ensemble de petits torrents de haute montagne dans les Alpes suisses. Il est cependant difficile d'établir des comparaisons avec nos rivières car les pentes des organismes étudiés par cet auteur sont toutes supérieures à 10-15 %. Il serait donc souhaitable à terme de tester la validité de notre relation sur d'autres cours d'eau morphologiquement proches. Nous pouvons néanmoins considérer qu'elle s'applique à de petites rivières torrentielles (pente du lit comprise entre 1 et 3 %) caractérisées par une bonne disponibilité en sédiments dans la bande active (présence de bancs de graviers facilement mobilisables).

Le suivi des crues qui se sont produites entre 1997 et 2002 nous donne des charriages annuels compris entre 500 et 800 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>. D'après les reconstitutions du transport en suspension de chaque bassin, fondées sur l'emprise spatiale des ravinements actifs et sur les taux d'ablation régionalement observés, ces charriages représenteraient entre 7 et 14% du transport solide total à l'exutoire. Ces valeurs sont à rapprocher de celle obtenue en calculant la part occupée par les roches résistantes dans la colonne stratigraphique des terrains rencontrés dans les 3 bassins. Nous obtenons 100 m de calcaires massifs pour 1250 m de roches tendres, soit un rapport de 10%. Ces taux sont conformes aux ordres de grandeur admis dans les rivières de montagne où la charge de fond représente rarement plus de 30% de la charge sédimentaire totale [Gregory et Walling, 1973 ; Alvera et Garcia-Ruiz, 2000]. Il faut cependant s'interroger sur la représentativité du rapport obtenu sur la Béoux, qui est faible compte tenu de la rétention amont des matériaux grossiers par les ouvrages RTM. On doit donc considérer les valeurs obtenues sur l'Esconavette et la Barnavette, qui oscillent autour de 13%, comme plus proches de la réalité.

La forte pluviosité enregistrée sur cette période nous amène à considérer les charriages annuels comme légèrement surévalués. Les valeurs pondérées par les superficies drainées sont comprises entre 20 et 67 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> (si nous admettons une densité de 2,65 t m<sup>-3</sup>, nous obtenons des valeurs comprises entre 53 et 177 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>). Si nous comparons ces résultats avec les quelques estimations disponibles dans les Préalpes drômoises, nous obtenons des charriages spécifiques conformes aux ordres de grandeur connus. L'Esconavette constitue le bassin le plus productif et elle est suivie de près par la Barnavette. En revanche, la Béoux présente un charriage pondéré plutôt faible. Ces

différences s'accroissent si nous divisons les sorties par les superficies des sources sédimentaires. Doit-on en conclure que les taux d'érosion sont supérieurs sur l'Esconavette ? La cartographie des zones de production sédimentaire ne conforte pas cette hypothèse. Les sédiments grossiers proviennent quasi-exclusivement des grands dérochoirs qui entaillent le versant occidental de la combe de Die-Recoubeau. La simple comparaison visuelle de ces vastes bassins de réception nous laisserait supposer des apports supérieurs sur la Béoux. L'ampleur des zones ravinées ainsi que les volumes de matériaux accumulés dans les zones de dépôts situées en contrebas immédiat des pentes dénudées suggèrent une plus forte productivité des versants. Il faut donc admettre une inadéquation entre le transport solide à l'exutoire et la production sédimentaire des hauts bassins. Plusieurs éléments confirment ce diagnostic. La comparaison des profils en long montre un couplage potentiel amont-aval plus efficace sur l'Esconavette. La pente générale du profil en long y est plus forte. D'autre part, son principal bassin de réception n'a jamais fait l'objet de correction torrentielle, contrairement aux 2 autres affluents sur lesquels des barrages en béton ont été construits à partir des années 1960. L'effet régulateur exercé par ces ouvrages sur le transport solide n'est pas anodin. Nous avons estimé la quantité de sédiments artificiellement stockée dans les atterrissements et nous obtenons, respectivement pour la Barnavette et la Béoux, les valeurs de 8 500 et 95 000 m<sup>3</sup> [Liébault et Beullens, 1997]. Ces chiffres représentent respectivement 12 et 170 fois le charriage annuel à l'exutoire. Si nous pouvons émettre quelques réserves sur l'effet régulateur que peuvent exercer les ouvrages sur la Barnavette, il apparaît clairement que les apports sédimentaires depuis l'amont ont été très fortement réduits sur la Béoux et ce d'autant plus que les plages d'atterrissements de ces ouvrages ont été régulièrement curées jusque dans les années 1990. D'autre part, l'effet de rétention se fait encore sentir aujourd'hui par contrôle sur le profil en long du torrent. La faiblesse du transport solide de la Béoux serait donc induite par une fourniture sédimentaire artificiellement déficitaire et elle démontrerait l'efficacité du dispositif de correction torrentiel sur la dynamique sédimentaire interne du bassin. Celui-ci réduirait d'environ 60 % le charriage annuel potentiel du bassin, calculé d'après la superficie des sources sédimentaires.

## 6. Estimation de la recharge sédimentaire à l'échelle régionale

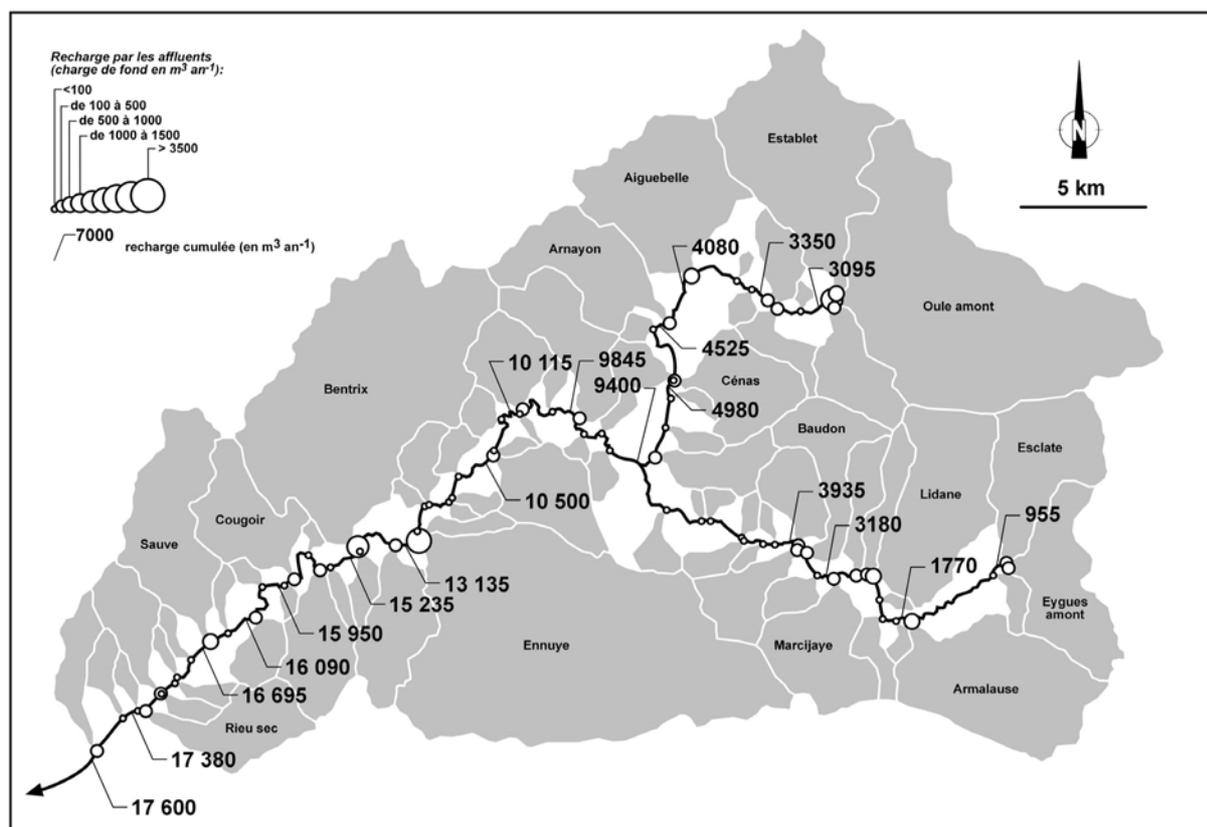
Le suivi du charriage sur 3 affluents de la Drôme, aussi complexe soit-il, peut difficilement résoudre à lui seul la délicate question de la recharge sédimentaire à l'échelle régionale. Nous sommes bien conscient du risque d'erreur inhérent à toute tentative d'extrapolation, notamment lorsque toute la lumière n'a pas été faite sur la variabilité des phénomènes étudiés. Néanmoins, nous nous trouvons aujourd'hui avec des données supplémentaires qu'il serait dommage de laisser dans l'ombre. Les volumes de charge de fond mesurés entre 1997 et 2002 apportent un élément de connaissance nouveau sur la dynamique de la recharge. Nous avons également établi une relation intéressante entre le charriage annuel et la taille de quelques bassins versants du Diois et des Baronnies. Nous connaissons également l'emprise spatiale des ravinements actifs connectés au réseau hydrographique dans les zones montagneuses des bassins de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion. Nous pensons que ces premiers outils suffisent pour entreprendre une approximation des apports en charge de fond à l'échelle régionale.

Avant de présenter les résultats obtenus, nous devons préciser la démarche adoptée, ses fondements et ses limites. Elle est fondée sur la relation empirique entre la charge de fond transportée annuellement et les superficies drainées (Fig. 156). Ce modèle statistique repose sur un ensemble de 9 rivières, dominé par les morphologies à bancs de graviers. Seule la Bine et le Soubriou présentent des lits à fond grossier caractérisés par une faible disponibilité sédimentaire. Il faut donc considérer nos estimations comme des ordres de grandeur probablement supérieurs à la réalité. Ceci est d'autant plus vrai que les charriages annuels mesurés sur l'Esconavette, la Barnavette et la Béoux peuvent également être interprétés comme des surévaluations compte tenu de la forte pluviosité enregistrée pendant la période de mesure. D'autre part, nous avons également observé que notre technique de mesure générait des résultats légèrement supérieurs à la réalité. Tous ces éléments convergent en faveur d'une estimation haute de la recharge. La situation inverse aurait été préjudiciable à l'interprétation des résultats.

Les zones montagneuses des bassins versants de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion ont été découpées manuellement en sous-bassins élémentaires d'après le relief des cartes topographiques au 1/100 000ème. Chaque affluent visible sur ces cartes a été pris en compte. Nous obtenons ainsi un découpage en 229 unités, dont les surfaces sont comprises entre 0,30 et 150 km<sup>2</sup>. Un découpage plus fin nous est apparu inadéquat, compte tenu de la marge d'erreur inhérente à notre démarche.

Les résultats obtenus pour le bassin versant de la Drôme à l'amont de Crest donnent une recharge cumulée en provenance des affluents de 26 670 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup> (Fig. 158). Si nous comparons ce chiffre au 30 000 m<sup>3</sup> de charriage annuel mesuré par la CNR dans le piège à graviers de Loriol [Landon, 1999], nous devons admettre une situation d'équilibre fragile. Ceci est d'autant plus vrai que les apports par recharge latérale (sapements de berges) peuvent être considérés comme nuls d'après les bilans effectués par analyse diachronique des photographies aériennes [Piégay, communication personnelle].



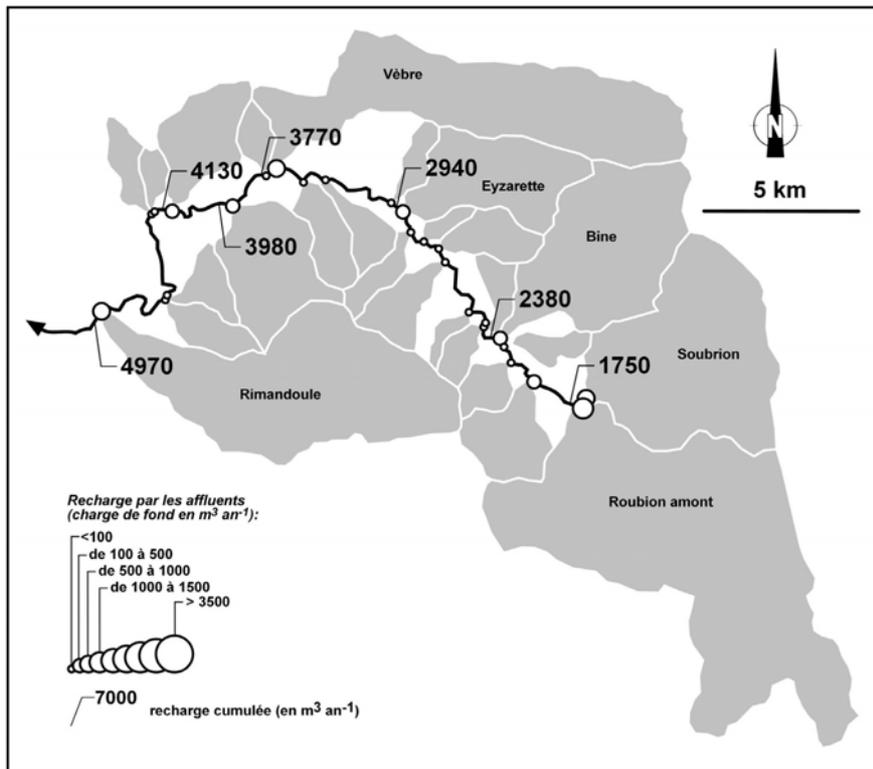


**Figure 159**

Estimation de la recharge sédimentaire de l'Eygues en amont de Mirabel-aux-Baronnies par ses affluents fondée sur la relation empirique entre la superficie drainée et le charriage annuel (Fig. 156)

Enfin, nous obtenons une recharge cumulée de  $4\,970\ m^3\ an^{-1}$  dans le bassin du Roubion à l'amont de Manas. Nous n'avons malheureusement pas de chiffre de transport solide à mettre en balance avec les apports, mais il est fort probable que la situation ne soit pas très différente de celle de ses voisins. Une étude morphologique récente de l'évolution du profil en long du Haut-Roubion, à l'amont des Gorges de Francillon, a démontré une incision de l'ordre d'un mètre sur la période 1931-1997, alors même que les extractions de graviers peuvent être considérées ici comme négligeables [Liébault et Piégay, 2001]. Même si quelques curages d'entretien ont pu influencer localement l'évolution altitudinale du lit, l'incision doit vraisemblablement résulter d'un déséquilibre entre la capacité de transport du cours d'eau et sa fourniture sédimentaire.

Nous avons comparé tous ces chiffres avec une estimation des entrées sédimentaires sur les branches maîtresses fondée sur une reconstruction de la charge en suspension transportée annuellement par ces trois rivières. Nous disposons d'une cartographie régionale des ravinements actifs réalisée à partir des photographies aériennes de 1991 dans le cadre d'une expertise conduite pour le compte de l'Office National des Forêts [Liébault *et al.*, 2001]. Cette couverture a été croisée avec la carte lithologique régionale (Fig. 86) de façon à connaître les surfaces des terrains ravinés sur marnes et sur alternances calcaréo-marneuses. Ce sont ces 2 types d'affleurements qui procurent l'essentiel de la charge fine des 3 rivières. Nous avons appliqué à ces surfaces les taux d'ablation



**Figure 160**

*Estimation de la recharge sédimentaire du Roubion en amont de Manas par ses affluents fondée sur la relation empirique entre la superficie drainée et le charriage annuel (Fig. 156)*

connus pour ces terrains ( $1 \text{ cm an}^{-1}$  pour les marnes et  $0,15 \text{ cm an}^{-1}$  pour les alternances calcaréo-marneuses ; cf. paragraphe 52). Nous obtenons ainsi une évaluation de la charge en suspension annuelle des 3 rivières. Si nous admettons que le rapport charge de fond/charge en suspension est de l'ordre de 15%, conformément aux valeurs observées sur l'Esconavette et la Barnavette, nous pouvons proposer une nouvelle évaluation des apports par charriage en provenance des sous bassins versants.

Les résultats obtenus à partir de cette approche présentent une très bonne adéquation avec ceux présentés précédemment pour les bassins de la Drôme et du Roubion (Tab. 46). Les ordres de grandeur de la recharge en sédiments grossiers sont très proches et ils se confirment mutuellement. Néanmoins, les apports en charge de fond obtenus sur l'Eygues à partir des surfaces ravinées sont très nettement supérieurs à ceux estimés d'après les superficies des bassins élémentaires ( $31\,610$  contre  $17\,600 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$ ). Ce décalage peut s'expliquer par le fait que le bassin de l'Eygues présente des conditions lithologiques différentes, marquées par une plus grande emprise spatiale des formations marneuses (Fig. 86). Celles-ci représentent 39% du bassin, alors que sur la Drôme et le Roubion, leur surface relative est proche de 32%. D'autre part, la surface pondérée des ravinements sur marnes est également plus forte sur l'Eygues avec une valeur de 2,21%, contre 0,77 et 1,33% pour la Drôme et le Roubion. Ceci implique un ratio charge de fond/charge en suspension plus faible par

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

rapport à celui utilisé dans les calculs et donc une probable surestimation de la charge de fond calculée à partir des surfaces ravinées. Quoi qu'il en soit, le chiffre proposé est compris dans la gamme du charriage de l'Eygues à Nyons [17 000 - 54 000 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>].

Tous ces résultats permettent de conclure qu'en l'état actuel des connaissances, rien ne prouve que l'enfoncement du lit des rivières Drôme, Eygues et Roubion pourra être compensé naturellement par les apports de charge de fond en provenance des affluents. Même si localement, des atterrissements peuvent se former à la suite de crues violentes, il faut considérer que sur le long terme, le déficit sédimentaire va perdurer à un rythme lent. L'arrêt des extractions de graviers a été évidemment bénéfique à l'évolution morphologique de ces rivières, mais il ne sera probablement pas suffisant pour rétablir un niveau altitudinal plus élevé par rapport à celui que nous connaissons aujourd'hui et qui pose de nombreux problèmes de gestion [Landon *et al.*, 1998].

#### **Tableau 46**

*Estimations de la recharge sédimentaire de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion fondées sur les surfaces en ravinement actif sur roches tendres et sur les taux d'ablation régionalement admis ; le rapport charge de fond/charge en suspension a été fixé à 15%, conformément aux proportions obtenues sur l'Esconavette et la Barnavette*

Bassins versants	Charge fine en provenance des ravinements sur marnes (m <sup>3</sup> an <sup>-1</sup> )	Charge fine en provenance des ravinements sur alternances calcaréo-marneuses (m <sup>3</sup> an <sup>-1</sup> )	Charge en suspension* (m <sup>3</sup> an <sup>-1</sup> )	Charge de fond (m <sup>3</sup> an <sup>-1</sup> )
Drôme <sup>1</sup>	105 400	70 230	175 630	<b>26 344</b>
Eygues <sup>2</sup>	176 490	34 225	210 715	<b>31 610</b>
Roubion <sup>3</sup>	28 680	1 950	30 630	<b>4 595</b>

1. à l'amont de Crest

2. à l'amont de Nyons

3. à l'amont de Manas

\* obtenue en faisant la somme des colonnes 2, et 3

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

## 7. Conclusion

L'approche morphologique mise en œuvre pour suivre le charriage sur 3 petites rivières torrentielles drômoises s'est montrée pertinente. Elle a permis de faire un certain nombre d'observations intéressantes sur la mobilité de la charge de fond dans un environnement qui tend aujourd'hui à se modifier. Les morphologies à nappes graveleuses, qui peuvent se manifester par des styles en tresses ou à bancs alternes, étaient en effet beaucoup plus fréquentes autrefois le long des petites rivières de montagne des Préalpes du Sud. Elles sont aujourd'hui progressivement remplacées par les morphologies à fond grossier sous l'effet du reboisement des versants et du tarissement consécutifs des apports sédimentaires depuis les versants. Il nous est donc apparu intéressant d'étudier la mobilité de la charge de fond qui caractérise ces formes fluviales relictuelles, qui se maintiennent dans quelques bassins versants où la fourniture sédimentaire est contrôlée par de grandes formes d'érosion toujours actives, les dérochoirs.

L'analyse de la fréquence du charriage et des seuils de mise en mouvement sur la période 1997-2002 a révélé que la charge de fond est mobilisée 6 à 7 fois par an en moyenne. Les différents paramètres hydrauliques qui permettent de mesurer l'énergie critique de remaniement des bancs de graviers ont été évalués et comparés aux valeurs communément observées dans les rivières graveleuses. Nous obtenons des résultats conformes à ceux obtenus dans des environnements fluviaux similaires aux nôtres. Nous pouvons ainsi proposer des forces tractrices critiques adimensionnelles comprises entre 0,020 et 0,060, des débits critiques qui oscillent entre 1,6 et 3,1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> et une relation entre la puissance spécifique et la taille des particules mobilisées conforme à celles proposées par Petit *et al.* [2000] dans de petites rivières torrentielles des Ardennes. La connaissance de ces paramètres constitue le point de départ des démarches qui visent à modéliser la capacité de transport d'une rivière à partir de la connaissance des conditions hydrauliques en crue. Nous envisageons aujourd'hui d'entreprendre ce travail en collaboration avec les hydrauliciens du CEMAGREF de Grenoble, spécialisés dans les rivières de montagne, afin de déterminer quelles sont les potentialités de transport des affluents de la Drôme. La comparaison des capacités de transport avec les fournitures sédimentaires potentielles dans les hauts bassins doit nous conduire à proposer des scénarios de transport solide pour les années à venir, en relation directe avec la délicate question de la restauration d'un potentiel de recharge dans les bassins versants des rivières incisées [Piégay et Stroffek, 2000 ; Liébault *et al.*, 2001].

Le suivi des distances de transport de la charge de fond, toujours sur la période 1997-2002, montre des déplacements annuels moyens compris entre 450 et 470 m. Nous observons également un contrôle morphologique sur les distributions des distances parcourues lors des crues. Ce contrôle est déterminé par la présence des bancs de graviers qui contribuent à piéger les particules en mouvement et donc à assurer ainsi leur maintien. La Barnavette, dont la morphologie est moins marquée par la présence des bancs, se caractérise par des déplacements individuels supérieurs. Ces observations confirment le fait que la transmissivité sédimentaire des tronçons peut être appréhendée à

partir de la connaissance morphologique de la rivière. L'espacement moyen des bancs de graviers, lui-même conditionné par la largeur de la bande active, permet ainsi de prédire les distances annuelles de transport. Ce type de relation empirique peut être utile pour évaluer à l'échelle régionale les vitesses de déplacement des sédiments grossiers et déterminer ainsi les potentialités de transmissivité sédimentaire des affluents sans qu'il y ait besoin d'engager de longues campagnes de suivi à partir de traceurs. Cette question constitue un élément important à considérer dans l'évaluation des potentialités de recharge sédimentaire d'un bassin versant.

Les distances annuelles de déplacement de la charge de fond observées sur 3 affluents de la Drôme montrent une bonne adéquation avec les vitesses de propagation vers l'aval des changements fluviaux étudiés dans la première partie de la thèse. Nous avons en effet montré que l'incision progressive induite par le tarissement des sources sédimentaires se déplace vers l'aval selon des vitesses comprises entre 300 et 500 m an<sup>-1</sup>. Ces ordres de grandeur, obtenus à partir d'approches différentes, doivent donc être considérés comme de bonnes approximations de la transmissivité sédimentaire des petites rivières torrentielles dont la pente est comprise entre 0,015 et 0,03 m m<sup>-1</sup>.

Les charriages annuels mesurés sur la période 1997-2002 oscillent entre 500 et 800 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>. Les valeurs pondérées par les superficies drainées sont fortes si nous les comparons aux valeurs connues dans les montagnes drômoises (67 et 51 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> pour l'Esconavette et la Barnavette), excepté pour la Béoux (20 m<sup>3</sup> km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>) dont le charriage spécifique se situe nettement en-dessous de ce à quoi on pourrait s'attendre compte tenu de l'activité géomorphologique de ses bassins de réception torrentiels. Nous interprétons ceci comme la preuve de l'efficacité du dispositif de correction torrentiel installé à partir des années 1960 le long des Torrents de Tréscherènes et du Mias. L'effet de rétention des sédiments dans les hauts bassins se fait ressentir sur les tronçons aval par un charriage atténué, sans commune mesure avec les potentialités déduites des sources sédimentaires. Nous estimons à ce titre que la Béoux n'exporte actuellement que 40 % des matériaux grossiers que son bassin est capable de produire et de transmettre jusqu'à l'exutoire.

Ces charriages représentent entre 7 et 14% du transport solide total qui a été reconstitué à partir des surfaces ravinées sur formations marneuses. Ces taux montrent bien que la charge de fond représente une faible part du transport solide, ce qui n'est pas surprenant dans une région dont la géologie est dominée par les formations marneuses.

Ces résultats nous conduisent à proposer une évaluation haute de la recharge sédimentaire en provenance des affluents à l'échelle régionale. Les résultats obtenus pour les bassins versants de la Drôme et de l'Eygues suggèrent une situation d'équilibre fragile entre les entrées et les sorties sédimentaires. Des conclusions similaires peuvent être formulées à l'égard du Roubion, compte tenu de l'incision généralisée de son profil en long à l'amont des Gorges de Francillon, dans un contexte faiblement perturbé par les extractions de graviers. En l'état actuel des connaissances, nous pouvons donc émettre des réserves sur les potentialités naturelles de restauration morphologique des bassins versants drômois. L'arrêt des extractions de graviers ne semble donc pas suffisant pour envisager un

### Troisième Partie: Le transport de la charge de fond

rehaussement naturel des profils en longs. Si cet objectif doit être atteint dans les années à venir pour assurer la stabilité des ouvrages établis à proximité de la rivière, il faudra combiner les stratégies de gestion visant à favoriser l'accumulation des matériaux dans les zones sensibles et à accélérer la recharge sédimentaire dans certains tronçons. Des réflexions sont actuellement en cours et plusieurs scénarios sont envisagés. Il est aujourd'hui nécessaire d'évaluer les contraintes et les bénéfices de chacun d'eux.