



**HAL**  
open science

# Régime sédimentaire et morphologie des rivières en tresses alpines et méditerranéennes Contribution du Cemagref Grenoble au projet typologie des rivières en tresses du bassin RMC

Frédéric Liébault, Mathieu Cassel, Hugo Jantzi, Sandrine Tacon, Nicolas Talaska

## ► To cite this version:

Frédéric Liébault, Mathieu Cassel, Hugo Jantzi, Sandrine Tacon, Nicolas Talaska. Régime sédimentaire et morphologie des rivières en tresses alpines et méditerranéennes Contribution du Cemagref Grenoble au projet typologie des rivières en tresses du bassin RMC. [Rapport de recherche] CEMAGREF GRENOBLE. 2010, pp.27. <hal-03148913>

**HAL Id: hal-03148913**

**<https://hal.science/hal-03148913v1>**

Submitted on 22 Feb 2021

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

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



HAL Authorization

## Régime sédimentaire et morphologie des rivières en tresses alpines et méditerranéennes

Contribution du Cemagref Grenoble au projet typologie des rivières en tresses du bassin RMC



*Cliché : M. Cassel.*

Étude réalisée sous la direction de Frédéric Liébault

Personnes ayant contribué à l'étude (par ordre alphabétique):  
Mathieu Cassel, Hugo Jantzi, Sandrine Tacon, Nicolas Talaska

Avril 2010

<b>1. Introduction générale</b> .....	3
<b>2. Etat de l'art et objectifs</b> .....	3
<b>3. Matériel et méthodes</b> .....	5
3.1. Evolution du profil en long .....	5
3.1.1. Analyse diachronique du profil en long .....	5
3.1.2. Forçages sédimentaires .....	8
3.1.3. Analyse morphométrique 2D .....	9
3.2. Morphologie des bandes de tressage .....	10
3.2.1. Transects topographiques .....	10
3.2.2. Echantillonnages granulométriques .....	13
<b>4. Résultats</b> .....	15
4.1. Régimes sédimentaires des tresses .....	15
4.2. Indicateurs morphométriques du régime sédimentaire .....	19
4.2.1. Forme du profil en long.....	19
4.2.2. Géométrie transverse.....	20
4.2.3. Granulométrie de surface .....	23
<b>5. Conclusions et perspectives</b> .....	24
<b>6. Bibliographie</b> .....	26

## 1. Introduction générale

Dans le cadre de la convention de recherche qui lie la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) et l'agence de l'eau RMC, une action a été initiée sur la gestion des rivières en tresses du SE de la France. L'objectif est de définir pour les années à venir des travaux de recherche interdisciplinaire permettant de mieux caractériser les rivières en tresses au niveau physique et écologique et proposer des actions de restauration fondées sur des bases plus solides. Ces travaux doivent servir à la fois à définir des priorités d'actions territoriales lors de la mise en œuvre de la DCE et à affiner les différentes mesures préconisées à l'échelle des schémas locaux pour la préservation ou la restauration écologique et la satisfaction des usagers en matière de sécurité et de disponibilité de la ressource en eau. Elle doit apporter des éléments de connaissance répondant aux orientations fondamentales suivantes : (OF2) concrétiser la mise en œuvre du principe de non dégradation des milieux aquatiques, (OF6) préserver et redévelopper les fonctionnalités naturelles des bassins et des milieux aquatiques, (OF8) gérer les risques d'inondations en tenant compte du fonctionnement naturel des cours d'eau.

Dans ce contexte, un projet scientifique interdisciplinaire a été construit collectivement entre scientifiques et gestionnaires sur le thème de la caractérisation fonctionnelle des rivières en tresses. L'objectif général est d'établir une typologie biomorphologique des tresses du bassin du Rhône. C'est en effet dans ce bassin que se concentrent la plupart des rivières de ce type sur le territoire métropolitain (plus de 600 km recensés), voire même en Europe. Cette typologie est fondée sur l'analyse d'une cinquantaine de tronçons en tresses représentatifs des différentes hydroécotones du bassin Rhône-Méditerranée (Slater, 2007), 12 d'entre eux seront ensuite sélectionnés pour faire l'objet d'analyses plus fines.

Les questions posées sont les suivantes : (1) existe-t-il des indicateurs simples permettant de replacer une tresse sur un gradient actif-déliquescent, de définir son état physique et d'identifier ainsi les principales actions à promouvoir en matière de sécurité publique et de gestion sédimentaire ? (2) quels sont les critères d'évaluation et les actions à préconiser pour préserver ou restaurer ces types fonctionnels ?

L'étude est programmée sur une période de 4 ans abordant successivement :

- les trajectoires géomorphologiques (Cemagref Grenoble) ;
- la caractérisation des habitats (UMR 5600 du CNRS et Université de Rennes) ;
- l'évaluation du potentiel écologique à partir de l'analyse des communautés d'invertébrés (UMR 5023 du CNRS).

Le Cemagref de Grenoble pilote le volet « trajectoires géomorphologiques » du projet, dont l'essentiel des actions est programmé la première année. Les résultats obtenus permettront de fournir un contexte physique sur lequel devra s'appuyer le volet « potentiel écologique » dont le démarrage est prévu en deuxième année.

## 2. Etat de l'art et objectifs

Les tresses sont des formes fluviales très dynamiques caractérisées par la multiplicité des chenaux et la présence de bancs actifs qui assurent le stockage temporaire de la charge sédimentaire en transit. Toujours associées à de forts apports solides, elles sont particulièrement fréquentes dans les milieux de montagne où elles assurent une fonction importante de régulation du transport solide par charriage. On les trouve notamment dans les environnements proglaciaires, sur les cônes de déjections, dans les vallées intramontagnardes et les zones de piémont.

D'un point de vue physique, les morphologies en tresses sont des systèmes naturels fascinants qui méritent d'être étudiés à plusieurs titres : (1) leur caractère très dynamique offre un cadre de premier choix pour étudier les interactions entre la morphologie des lits sédimentaires et les contraintes hydrauliques ; (2) style fluvial associé à un transport solide intense, les tresses constituent un élément

essentiel de la cascade sédimentaire dans les zones de montagne ; (3) le caractère instable des lits en tresses peut être à l'origine de situations à risques pour les populations des zones de montagne et de piémont.

Les travaux de géomorphologie historique conduits dans le SE de la France montrent de façon très nette une tendance à la disparition du tressage dans les vallées alpines depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle (Bravard and Peiry, 1993; Liébault et al., 2008). Ce constat amène à se poser la question du caractère relictuel du tressage, qui ne serait plus en équilibre avec les conditions environnementales actuelles. L'artificialisation des plaines alluviales (endiguements, extractions de graviers, barrages) ainsi que le tarissement des apports solides des versants sous l'effet du reboisement et du réchauffement climatique post-PAG contribuent à expliquer la déliquescence progressive du tressage au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Malgré cette tendance générale, une grande diversité de situation existe dans le bassin du Rhône, depuis les tronçons où le tressage a entièrement disparu et a été remplacé par un lit à chenal unique, ceux où il se maintient sous une forme dégradée et ceux, peu nombreux, caractérisés par un tressage encore très actif.

Bien que la mécanique du tressage ait fait l'objet de nombreux travaux à la fois théoriques et expérimentaux, beaucoup de zones d'ombre subsistent sur la dynamique géomorphologique des tresses et ses relations avec les principaux paramètres de contrôle que sont les flux solides, la capacité de transport (fonction de la pente et du débit liquide) et la végétation riveraine. L'intensification du tressage sous l'effet d'apports solides intenses est aujourd'hui clairement établie grâce notamment aux analyses historiques des réponses fluviales (Church, 1983; Liébault et al., 2005; Madej and Ozaki, 1996). Les approches expérimentales ont également permis de montrer que l'aggradation des tresses est associée à la multiplication des anabranches et à l'accrétion des bancs alors que la dégradation s'accompagne d'une simplification du tressage et du perchement des bancs (Germanoski and Schumm, 1993; Hoey and Sutherland, 1991). En revanche, le lien entre l'intensité du tressage et le transport solide par charriage est loin d'être évident, certains auteurs montrant une corrélation positive (Nicholas, 2000) et d'autres l'inverse (Ashmore, 1988). Ceci rend difficile l'interprétation fonctionnelle du tressage, perçu comme le résultat d'une charge sédimentaire en excès par rapport à la capacité de transport du lit ou comme une morphologie optimisée pour véhiculer de fortes charges sédimentaires imposées par l'amont. Ces deux visions s'opposent car dans le premier cas, la tresse ne peut perdurer que si le régime sédimentaire reste excédentaire alors que dans le deuxième cas, le tressage est considéré comme une forme d'équilibre dynamique. Les tresses du SE de la France offrent un cadre exceptionnel pour aborder ces questions du fait de la diversité morphologique des lits en tresses qui caractérise la région et de l'abondance des sources historiques disponibles pour caractériser les régimes morphologiques (archives topographiques, photographies aériennes).

L'objectif de cette étude est de caractériser et d'analyser le régime sédimentaire des tresses alpines et méditerranéennes du bassin Rhône-Méditerranée à l'échelle du siècle à partir de l'étude des changements morphologiques et des forçages en jeu. Nous pensons en effet que le régime sédimentaire est un élément décisif en matière de prédiction des trajectoires morphologiques du tressage. Trois types de situations peuvent être rencontrés : régime en équilibre (lit stable), régime déficitaire (lit incisé) et régime excédentaire (lit exhausé). Nous suspectons que la généralisation des situations déficitaires est un élément explicatif majeur de la disparition progressive du tressage dans le bassin Rhône-Méditerranée. Les objectifs poursuivis sont les suivants : (1) fournir des éléments objectifs permettant de déterminer pour chaque tronçon (n~30) dans quelle situation il se trouve à l'échelle des dernières décennies (équilibre, excédent, déficit) ; (2) mettre en relation le régime sédimentaire avec la morphométrie des bandes de tressage ; (3) coupler les types de régimes sédimentaires avec les apports et prélèvements sédimentaires du bassin versant.

### 3. Matériel et méthodes

#### 3.1. Evolution du profil en long

L'objectif est de caractériser le régime sédimentaire des tresses du bassin Rhône-Méditerranée sur un pas de temps séculaire à partir de l'étude diachronique du profil en long. Cette analyse repose sur 32 sites. Il s'agit également d'interpréter la variabilité des régimes sédimentaires à la lumière des forçages ayant influencé le bilan sédimentaire des tresses (prélèvements et sources sédimentaires). Enfin, l'analyse morphométrique du profil en long permet de proposer un indicateur morphométrique 2D du régime sédimentaire.

##### 3.1.1. Analyse diachronique du profil en long

Sur les 50 sites préalablement sélectionnés dans le projet, 32 ont pu faire l'objet d'une analyse diachronique du profil en long (Fig. 1, Tab.1). Certains sites ne disposent pas d'ancien levé et d'autres présentent des conditions jugées défavorables pour l'acquisition topographique terrestre (absence ou inaccessibilité des repères de nivellement de l'IGN). L'analyse repose sur la superposition de profils en long mesurés à 2 dates différentes.

Nous avons utilisé le profil en long des Grandes Forces Hydrauliques (GFH) datant de la fin du 19e et du début du 20e siècle pour caractériser l'altitude des tresses au temps  $T_0$  ([http://geodesie.ign.fr/PR/profils\\_rivieres.htm](http://geodesie.ign.fr/PR/profils_rivieres.htm)). Le temps  $T+1$  a été renseigné par des acquisitions topographiques propres à cette étude, réalisées entre mai et août 2009 (Tab. 1). Deux sites font exceptions : la Durance et la Drôme de Recoubeau (Drôme\_dis) où nous avons pu exploiter des levés acquis dans le cadre d'études récentes.

Les acquisitions topographiques ont été réalisées principalement par nivellement (26/32) et accessoirement à la station totale (3/32) et au dGPS (2/32) lorsque les repères de nivellement étaient difficilement accessibles. Au global, 129 km ont été levés dont 120 km de tresses. Les cheminements topographiques ont été généralement calés sur 2 repères de nivellement de l'IGN de façon à calculer l'erreur altimétrique globale du profil (Tab. 1). Les levés ont été réalisés en conditions de basses eaux et les points de mesure ont été positionnés sur la ligne d'eau.

Les distances des profils GFH ont été rectifiées en utilisant des points de calage communs avec le levé récent à partir de la formule suivante :

$$D_{ij_{t_0\bullet}} = D_{ij_{t_0}} + D_{ij_{t_0}} \left( \frac{D_{c_{t_1}} - D_{c_{t_0}}}{D_{c_{t_1}}} \right) \quad (1)$$

Avec  $D_{ij_{t_0\bullet}}$ , la distance rectifiée entre les points  $i$  et  $j$  du profil GFH,  $D_{ij_{t_0}}$  la distance entre les points  $i$  et  $j$  du profil GFH,  $D_{c_{t_1}}$  la distance entre les points de contrôle du profil actuel,  $D_{c_{t_0}}$  la distance entre les points de contrôle du profil GFH.

Les profils ont ensuite été superposés et segmentés en une cinquantaine de points équidistants (Fig. 2). Après interpolation linéaire des altitudes de chaque point, la variation altitudinale entre les deux profils a été calculée (1755 valeurs). Le seuil de détection de l'incision et de l'exhaussement a été fixé à 50 cm. Il intègre le D90 de l'erreur altimétrique (18 cm) auquel il faut rajouter les fluctuations d'altitudes liées à la variabilité hydrologique et au recalage des distances. Ces deux dernières composantes de l'incertitude ne peuvent être quantifiées mais seulement évaluées de manière experte à quelques dizaines de centimètres.

Cette analyse permet de capturer le changement altitudinal et de déterminer le régime sédimentaire de la tresse. Les tresses en exhaussement (ou aggradation) témoignent d'un régime excédentaire alors que les tresses en incision (ou dégradation) ont un régime déficitaire.

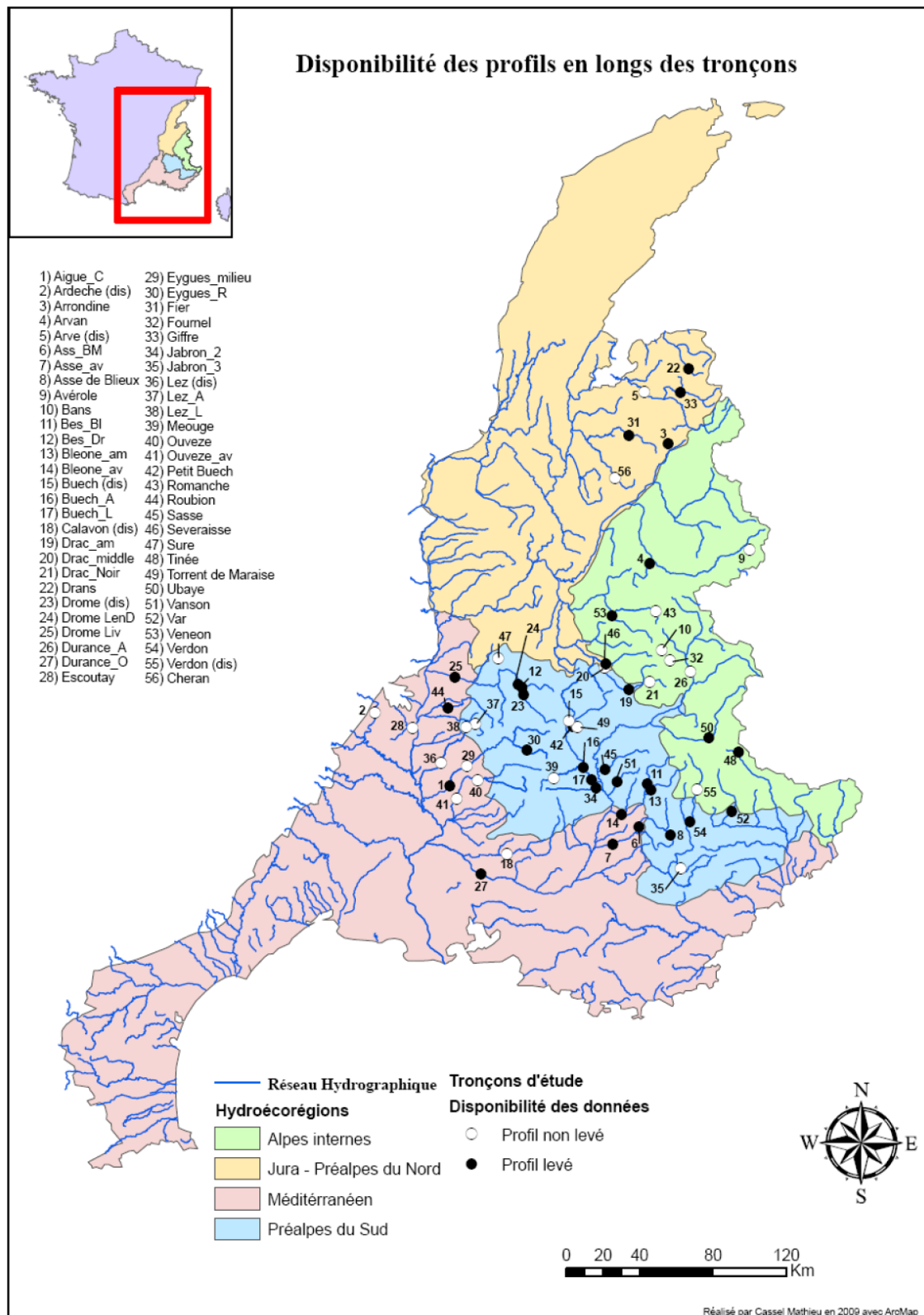


Figure 1. Localisation des 56 sites retenus dans le projet et des 32 sites ayant fait l'objet d'une analyse du profil en long

SITES	DATE	OPERATEURS	LINEAIRE (m)	LINEAIRE_TRESSES (m)	TYPE	ERREUR/IGN(m)
AIGUES_C	18/06/2009	Cemagref	6122	6122	nivellement	0.015
ARRONDINE	28/05/2009	Cemagref	1657	1117	nivellement	0.116
ARVAN	03/08/2009	Cemagref	2720	1182	nivellement	0.045
ASSE_AV	03/06/2009	Cemagref	3477	3477	nivellement	0.019
ASSE_BLIEUX	05/06/2009	Cemagref	2874	2583	nivellement	0.160
ASSE_BM	04/06/2009	Cemagref	4416	4416	nivellement	0.150
BES_BLEONE	06/07/2009	Cemagref	4110	4110	nivellement	0.052
BEZ_DROME	05/05/2009	Cemagref	4234	3869	nivellement	0.156
BLEONE_AM	07/07/2009	Cemagref	5990	5990	nivellement	
BLEONE_AV	08/07/2009	Cemagref	4553	4553	nivellement	0.007
BUECH_A et L	18/08/2009	Cemagref, CNRS	16863	16863	dGPS	
DRAC_AM	10/08/2009	Cemagref	3229	2673	nivellement	0.045
DRANSE_MORZINE	24/06/2009	Cemagref	1833	1196	nivellement	
DROME_dis	23/05/2005	CNRS	5683	3865	nivellement	0.220
DROME_LenD	19/05/2009	Cemagref	3610	3360	nivellement	0.182
DROME_LIVRON	15/07/2009	Cemagref	4883	4883	nivellement	0.076
DURANCE_O	13-14/08/2008	SMAVD	12140	12140	dGPS	
EYGUES_R	18/06/2009	Cemagref	2473	2473	nivellement	0.066
FIER	29/07/2009	Cemagref	3714	3714	nivellement	0.021
GIFFRE	28/07/2009	Cemagref	2934	2668	nivellement	0.026
JABRON_2	11/06/2009	Cemagref	2871	2871	nivellement	0.066
PETIT_BUECH	06/05/2009	Cemagref	3280	3280	nivellement	0.219
ROUBION	16/07/2009	Cemagref	1438	1438	nivellement	0.067
SASSE	10/06/2009	Cemagref	4409	3913	nivellement	0.108
SEVERAISSE	04/08/2009	Cemagref	3247	2342	nivellement	0.040
TINEE	20/07/2009	Cemagref	1479	1479	tachéométrie	
UBAYE	11/08/2009	Cemagref	3771	3771	nivellement	0.014
VANSON	09/06/2009	Cemagref	2263	2263	nivellement	0.026
VAR	21/07/2009	Cemagref	3477	3477	tachéométrie	
VENEON	05/08/2009	Cemagref	3185	2045	nivellement	0.015
VERDON	22/07/2009	Cemagref	2052	2052	tachéométrie	
<b>TOTAL (m)</b>			<b>128987</b>	<b>120185</b>		

Tableau 1. Récapitulatif des différents tronçons levés (SMAVD : Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance)

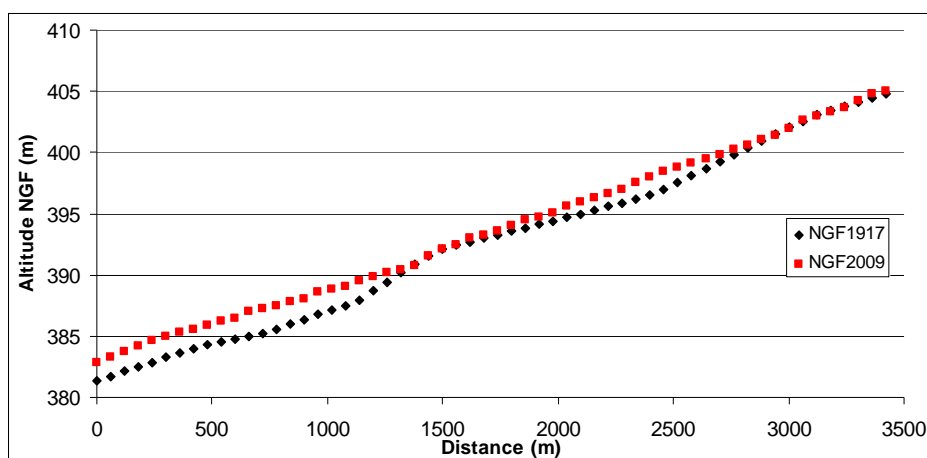


Figure 2. Exemple de superposition du profil en long des GFH et du profil récent pour l'Asse aval

### 3.1.2. Forçages sédimentaires

Le régime sédimentaire des tresses est conditionné par les apports et prélèvements de graviers. Ceux-ci ont été évalués qualitativement à partir des orthophotographies aériennes récentes.

- Caractérisation des sources sédimentaires

Deux grands types de sources sédimentaires alimentent les tresses en graviers : (1) les sapements de berges qui remobilisent des stocks alluvionnaires (terrasses, plaine alluviale) ; (2) le transport solide des torrents sous forme de charriage ou de lave torrentielle. L'identification des apports sédimentaires s'est appuyée sur l'analyse d'orthophotographies récentes sur SIG. Une cartographie systématique des sources sédimentaires a été réalisée sur un linéaire comprenant le tronçon d'étude auquel nous avons rajouté un linéaire de 10 km en amont de façon à prendre en compte les apports susceptibles d'avoir influencé l'évolution du profil sur les 20 dernières années, en considérant une vitesse de propagation de la charge grossière de quelques centaines de mètres par an (Liébault and Clément, 2007). Ceci permet de caractériser le potentiel de restauration sédimentaire du cours d'eau depuis l'arrêt théorique des extractions de graviers (loi sur l'eau de 1992).

L'ensemble des confluences torrentielles ont été cartographiées et caractérisées selon deux critères: (1) visibilité de la bande active du torrent selon 3 modalités (non visible – visible de manière discontinue – visible de manière continue) ; (2) impact des apports du torrent sur la morphologie du cours d'eau récepteur à l'aval de la confluence (présence d'un cône de déjection, élargissement de la bande active en aval de la confluence) (Fig. 3). Cette analyse a permis de recenser 414 sources torrentielles caractérisées par l'importance de leur contribution sédimentaire. Sur ces 414 sources, 61 ont été reconnues comme des sources sédimentaires majeures (présence d'impact sur le cours principal).



Figure 3. Confluent torrentiel avec impact fort sur le cours d'eau principal ; à l'aval des apports sédimentaires du Salso Moreno, la bande active de la Tinée présente un fort élargissement

Le linéaire des berges a été systématiquement digitalisé sur l'ensemble des sites à partir des orthophotographies récentes (fig. 4). Les berges sont différenciées selon deux modalités (berges érodables et berges stables). Sont considérés comme stables les berges protégées par des aménagements (digues, enrochements) ou en contact direct avec les versants. Les aménagements ne sont pas toujours clairement identifiables. Dans ces cas, ils sont considérés comme probables lorsque des infrastructures (routes, bâtiments) se situent à proximité immédiate de la bande de tressage. Le linéaire de berge ne répondant pas aux critères de stabilité est considéré comme érodable. Le ratio du

linéaire de berge érodable sur l'ensemble du linéaire de berge du tronçon étudié fournit un degré d'érodabilité et donc une estimation quantitative indirecte de la recharge sédimentaire par érosion latérale. Cette analyse a porté sur un linéaire de 825 km. 51% du linéaire digitalisé est constitué de berges érodables.

- Caractérisation des prélèvements sédimentaires

Les principaux sites d'extractions actuels et passés ont été cartographiés sur le tronçon d'étude et sur un linéaire de 10 km de part et d'autre du tronçon (Fig. 4). Nous avons retenu comme site d'extraction les gravières en activité dans la plaine alluviale et les anciennes traces d'activité minière majeure visibles sur les orthophotographies récentes. Le nombre de sites par tronçons fournit une information qualitative sur l'importance des prélèvements sédimentaire. Cette analyse a permis de localiser 79 sites d'extractions.

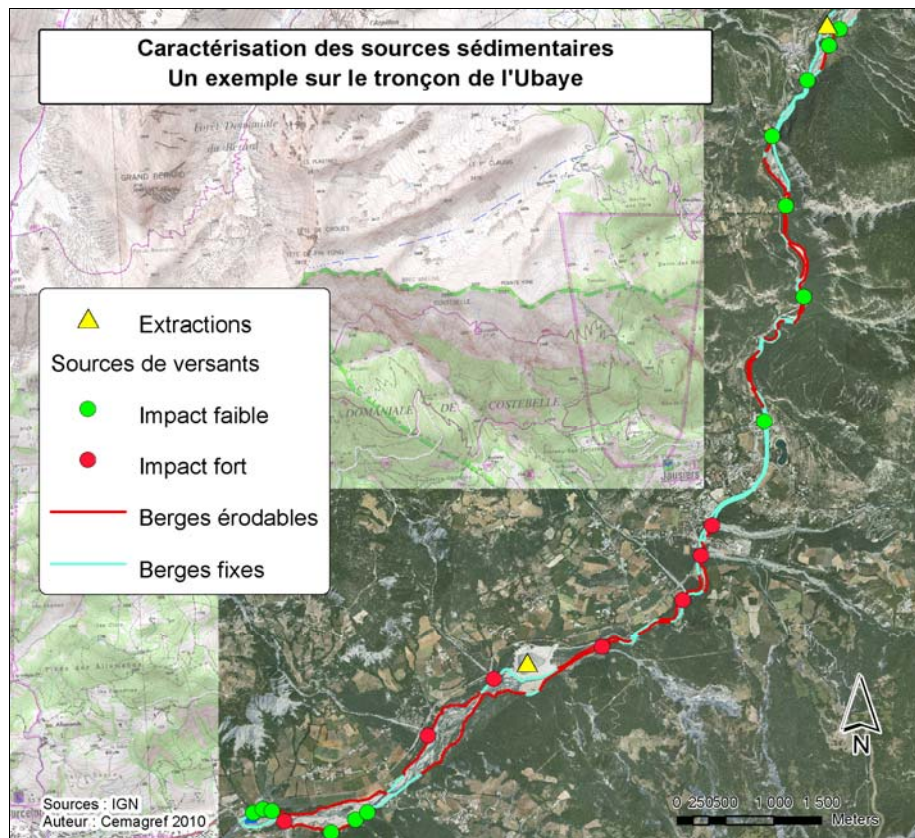


Figure 4. Exemple d'inventaire cartographique des sources et prélèvements de sédiments sur le site de l'Ubaye

### 3.1.3. Analyse morphométrique 2D

Une analyse morphométrique du profil en long récent a été conduite afin d'évaluer l'influence du régime sédimentaire (aggradation vs. dégradation) sur la forme générale du profil caractérisé sur une distance équivalente à ~20 fois la largeur de la bande de tressage. Les profils ont été normés (formules 2 et 3) et un indice de forme ( $F$ ) a été calculé pour chaque point (formule 4):

$$D_i^* = \frac{D_i}{D_n - D_i} \quad (2)$$

$$Z_i^* = \frac{Z_i}{Z_n - Z_i} \quad (3)$$

$$F = Z_i^* - D_i^* \quad (4)$$

Avec  $Z_i^*$ , l'altitude normée du point  $i$ ,  $Z_i$ , l'altitude du point  $i$  et  $Z_n$ , l'altitude maximale du profil,  $D_i^*$ , la distance normée du point  $i$ ,  $D_i$ , la distance du point  $i$  et  $D_n$  la distance maximale du profil.

Lorsque  $F$  est négatif, le segment est concave et lorsque  $F$  est positif, le segment est convexe. La variabilité de  $F$  en fonction de l'évolution altitudinale a ensuite été analysée à partir d'un test statistique.

### 3.2. Morphologie des bandes de tressage

L'étude du profil en long permet de distinguer les tresses incisées, exhausées et stables à l'échelle du siècle. L'objectif de l'analyse morphologique des bandes de tressage est d'étudier les caractéristiques morphométriques de ces différents groupes afin d'aboutir à des indicateurs simples permettant de replacer une tresse sur un gradient actif-déliquescent. Elle repose sur la réalisation de profils en travers et d'échantillonnages granulométriques de surface.

#### 3.2.1. Transects topographiques

D'après les résultats de l'analyse diachronique du profil en long, les tronçons ont été redécoupés selon leur régime sédimentaire. Pour chaque sous-tronçon, des profils en travers de la bande de tressage ont été réalisés. Pour les sous-tronçons en exhaussement, les profils ont été décuplés afin d'obtenir une répartition équilibrée entre les transects en incision et en exhaussement. Sur le terrain, le transect est choisi selon sa représentativité du sous-tronçon et de préférence sur le secteur où la bande de tressage présente la plus forte diversité d'unité (bancs, chenaux). Les morphologies particulières sont exclues, de même que les sites perturbés par des aménagements ou interventions anthropiques.

Pour la réalisation des levés topographiques, le matériel utilisé est le niveau de chantier (46/48) ou le tachéomètre (2/48). Les points ont été positionnés à chaque rupture de pente et d'unité. Les types d'unité sont décrits (terrasse, chenal principal, banc, ...). Les bancs sont décrits selon leur degré de végétalisation avec les classes suivantes : 0 % ; ]0-25 %] ; ]25-50 %] ; ]50-75 %] ; ]75-100 %] ; 100 %. Pour les terrasses, l'épaisseur de limon est notée (Fig. 5).

Les données acquises sur le terrain ont permis de calculer différentes variables (Tab. 2). Les différentes unités ont été caractérisées par leur altitude moyenne et leur largeur. La bande active a été caractérisée par sa largeur à pleins bords. Au vu de la complexité géométrique des rivières en tresses, les profondeurs moyennes et maximales n'ont pu être calculées que sur une bande active élargie, incluant les bancs peu végétalisés (0-25%). Des indices de rugosité altitudinale (*Bed Relief Index*) ont été calculés en utilisant les formules de (Smith, 1970) et (Hoey and Sutherland, 1991) (Tab. 2). Le BRI de Smith (Formule 5) exprime la somme des changements altitudinaux le long du profil en travers rapportée à la longueur du profil. Celui de Hoey et Sutherland (Formule 6) mesure la déviation standard du profil en travers par rapport à l'élévation moyenne du lit. Des analyses statistiques bivariées ont été réalisées à partir de ces variables et celles de l'analyse granulométrique.

$$BRI(Smith) = \frac{2[(Z_1 + \dots + Z_n) - (z_1 + \dots + z_n)] \pm z_{e1}, z_{e2}}{L} 100 \quad (5)$$

avec  $(Z_1 + \dots + Z_n)$ , la somme des altitudes des points hauts du transect,  $(z_1 + \dots + z_n)$ , la somme des altitudes des points bas du transect,  $L$ , la longueur de la ligne de mesure et  $z_{e1}$  et  $z_{e2}$ , l'altitude des 2 points d'extrémité de la ligne de mesure.

$$BRI(Hoey) = \left( \sum_{i=1}^{n-1} \left[ (z_i^2 + z_{i+1}^2) / 2 \right]^{0.5} [x_{i+1} - x_i] \right) / (x_n - x_1) \quad (6)$$

avec  $z_i$ , la différence entre l'altitude du point  $i$  et l'altitude moyenne du transect et  $x_i$ , la distance du point  $i$ .

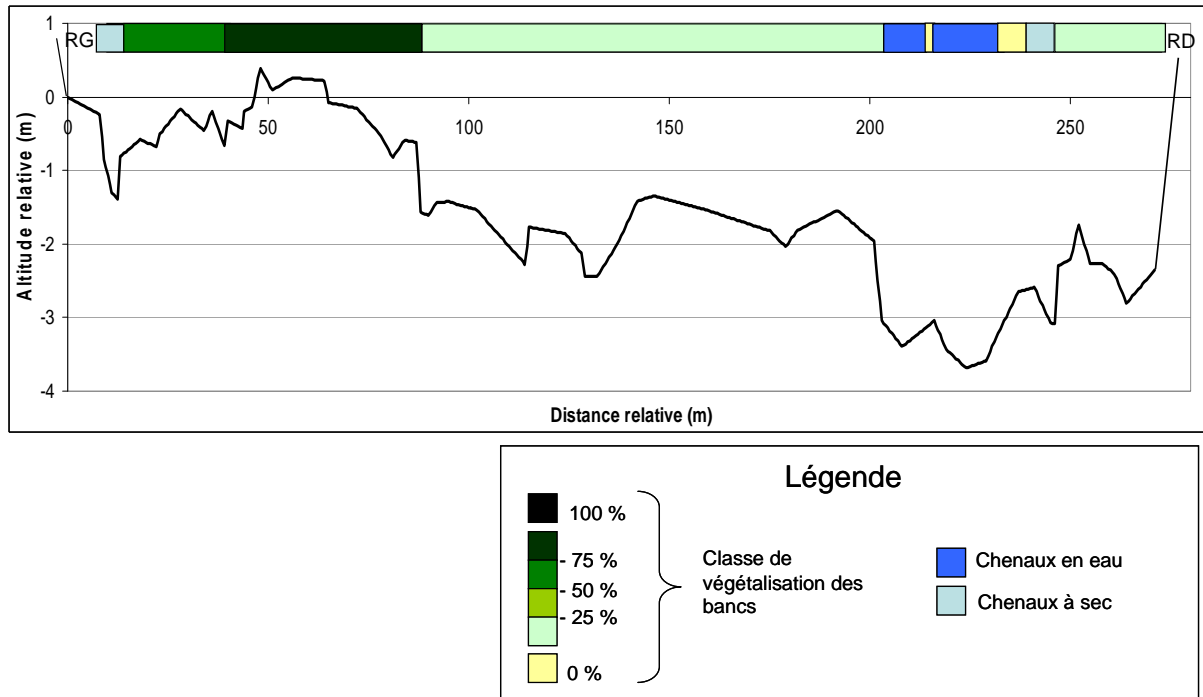


Figure 3. Exemple d'identification des unités pour le profil en travers Var\_T1

Variabiles	Symboles	Unités
Surface drainée	$A$	km <sup>2</sup>
Pente du lit	$s$	m/m
Largeur du fond de vallée (remplissage alluvial)	$W_f$	m
Largeur de la bande naturelle (bande active + végétation riveraine)	$W_n$	m
Largeur du transect	$W_t$	m
Largeur de la bande active (chenaux en eau, chenaux secs et bancs non végétalisés)	$W_a$	m
Largeur de la bande semi-active (bande active + bancs végétalisés entre 0 et 25%)	$W_b$	m
Evolution altitudinale séculaire (déterminée à partir du profil GFH)	$\Delta Z$	m
Largeur cumulée des chenaux en eau	$w_c$	m
Largeur cumulée des chenaux à sec	$w_{cs}$	m
Largeur cumulée des bancs non végétalisés	$w_{b0}$	m
Largeur cumulée des bancs végétalisés (entre 0 et 25%)	$w_{b0-25}$	m
Largeur cumulée des bancs végétalisés (entre 25 et 50%)	$w_{b25-50}$	m
Largeur cumulée des bancs végétalisés (entre 50 et 75%)	$w_{b50-75}$	m
Largeur cumulée des bancs végétalisés (entre 75 et 100%)	$w_{b75-100}$	m
Largeur cumulée des bancs végétalisés (100%)	$w_{b100}$	m
Largeur de la bande active normalisée ( $W_a / W_n$ )	$W^*$	
Profondeur moyenne de la bande active	$d_b$	m
Profondeur maximale de la bande active	$d_{max}$	m
Dénivellation maximale de la bande semi-active	$H_{max}$	m
Altitude moyenne des chenaux en eau	$Z_c$	m
Altitude moyenne des chenaux à sec	$Z_{cs}$	m
Altitude moyenne des bancs non végétalisés	$Z_{b0}$	m
Altitude moyenne des bancs végétalisés (entre 0 et 25%)	$Z_{b0-25}$	m
Altitude moyenne des bancs végétalisés (entre 25 et 50%)	$Z_{b25-50}$	m
Altitude moyenne des bancs végétalisés (entre 50 et 75%)	$Z_{b50-75}$	m
Altitude moyenne des bancs végétalisés (entre 75 et 100%)	$Z_{b75-100}$	m
Altitude moyenne des bancs végétalisés (100%)	$Z_{b100}$	m
Altitude moyenne de la haute terrasse	$Z_{t1}$	m
Altitude moyenne de la basse terrasse	$Z_{t2}$	m
Altitude moyenne de la bande active	$Z_a$	m
Altitude moyenne de la bande semi-active	$Z_b$	m
Dénivellation entre la bande active et les chenaux en eau ( $Z_a - Z_c$ )	$H_{ba}$	m
Ratio largeur/profondeur ( $W_b / d_b$ )	$wdr$	
Bed Relief Index de Smith (équation 5)	$BRI$ (Smith)	
Bed Relief Index de Hoey et Sutherland (équation 6)	$BRI$ (Hoey)	

Tableau 2. Liste et description des variables calculées sur chaque transect

### 3.2.2. Echantillonnages granulométriques

Pour affiner la caractérisation morphologique des sites, nous avons procédé à des échantillonnages granulométriques de surface. Compte tenu du grand nombre de transects à échantillonner dans un temps restreint, nous avons utilisé le logiciel Digital Gravelometer (DG) conçu pour le traitement automatisé d'échantillons granulométriques de surface à partir de photographies numériques (Graham et al., 2005a; Graham et al., 2005b; Graham et al., 2010). La rapidité de mise en œuvre de cette méthode sur le terrain a permis de collecter 245 échantillons.

Le protocole de terrain pour la prise des photographies reprend les préconisations du mode d'emploi de DG. Nous avons utilisé un cadre rectangulaire de 550 x 360 mm afin d'échantillonner toujours la même surface (Fig. 6). Les photographies ont été prises avec un appareil numérique réflex Pentax, en utilisant le flash, une distance focale moyenne pour éviter les déformations de l'image, et une résolution de 6 megapixels.

Avant la prise de vue, la surface délimitée par le cadre est nettoyée si nécessaire (enlèvement des feuilles et brindilles qui masquent les particules). La prise de vue est faite à la verticale du sol et la surface échantillonnée est ombragée à l'aide d'un parasol pour éviter les ombres portées des particules.

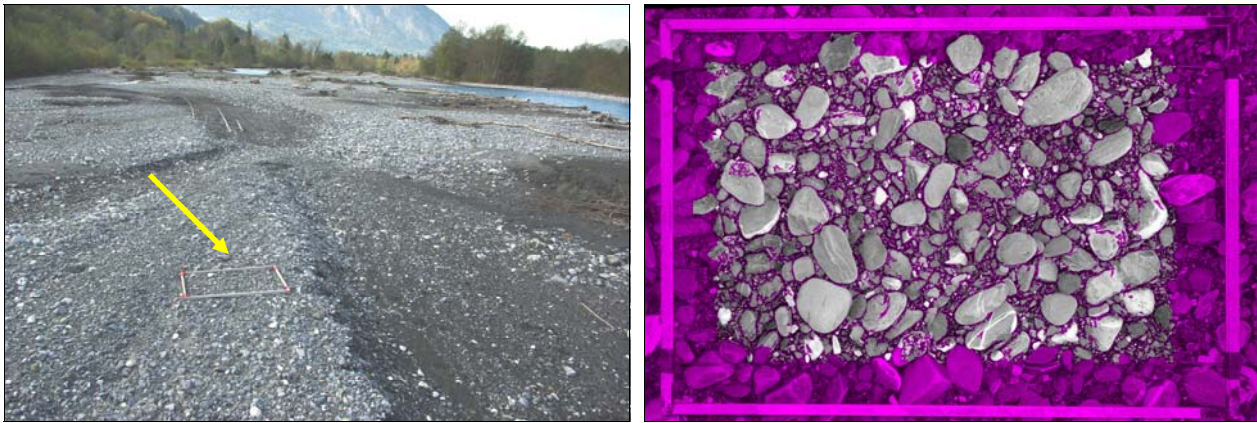


Figure 4. Echantillonnage granulométrique *in situ* et traitement automatique de l'image par Digital Gravelometer ; le cadre posé au sol délimite la surface à photographier ; la photographie est ensuite géoréférencée dans DG à l'issue de plusieurs étapes, le logiciel délimite le contour de chaque particule avant de les mesurer et de calculer une distribution granulométrique

Dans la mesure du possible, chaque unité morphologique traversée par le transect a fait l'objet d'un échantillonnage représentatif de la granulométrie dominante. Tous les échantillons granulométriques d'un transect ont ensuite été agglomérés et pondérés selon l'importance de l'unité échantillonnée. Nous disposons de 45 granulométries composites représentant les caractéristiques granulométriques des transects. Nous avons également affiné les résultats en générant des granulométries composites pour les différents espace de la bande alluviale (transect entier, bande active élargie, bande active stricte).

Le traitement des images par le logiciel s'est révélé peu satisfaisant pour 80% des échantillons. Les erreurs liées au mauvais traitement des images induisent une sous-estimation de la taille réelle des particules du fait de la sur-segmentation des particules grossières. Les résultats ont donc été corrigés à l'aide d'un modèle statistique. Les distributions granulométriques de 10 images présentant un traitement non satisfaisant à partir de l'analyse automatique sur DG ont été comparées avec une méthode manuelle. Les deux méthodes de calculs sont comparables. Les résultats de la méthode manuelle servent de référence. Le nuage de point (Fig. 7) illustre les écarts de résultats entre les deux méthodes. Pour les petits percentiles les écarts sont faibles (les points sont très proches de la droite

d'égalité) alors que sur les gros percentiles les écarts sont importants. Les écarts montrent que DG sous-estime la taille des particules par rapport à la méthode manuelle. La droite d'ajustement du nuage de point donne une très bonne corrélation entre les deux méthodes ( $R^2$  proche de 1). L'équation de cette droite est utilisée pour corriger les résultats de l'analyse automatique sur les photos présentant un traitement non satisfaisant.

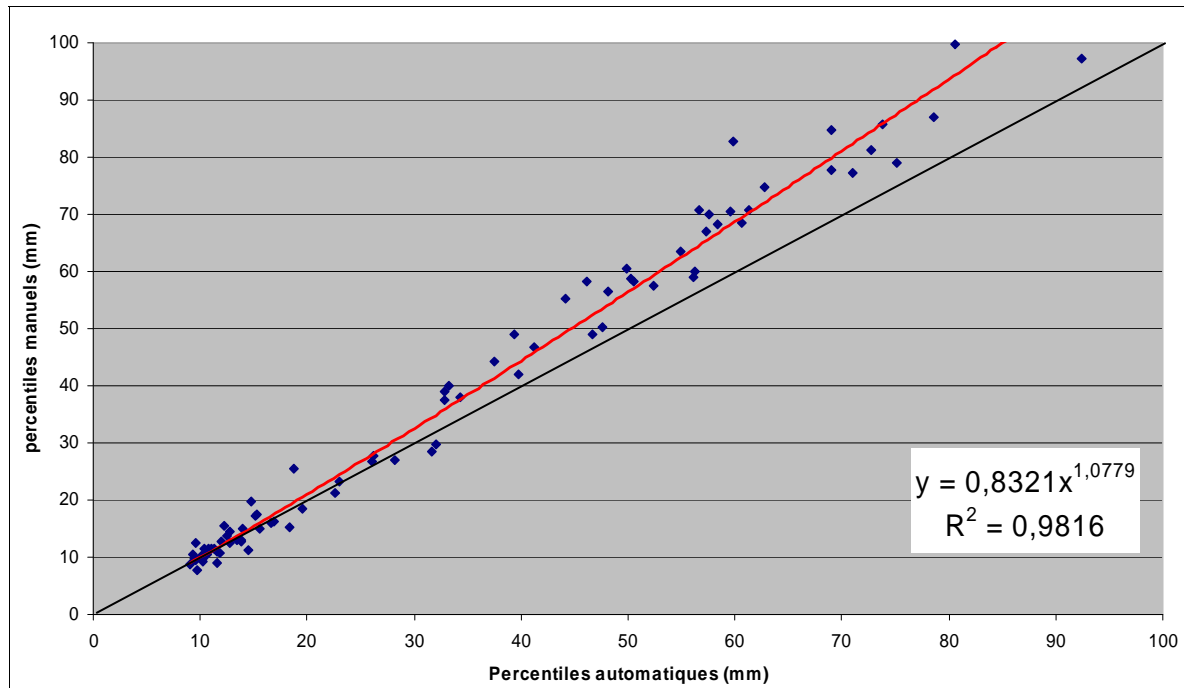


Figure 5. Modèle de correction des distributions granulométriques par comparaison des résultats obtenus par l'analyse manuelle (référence) et le traitement automatique

## 4. Résultats

### 4.1. Régimes sédimentaires des tresses

Les rivières en tresses étudiées présentent une tendance dominante à l'incision (Fig. 8) entre le début du XX<sup>ème</sup> siècle et aujourd'hui. Près de 57% des sous-trançons présentent une incision significative (supérieure à 0,5 m) contre 21% pour un exhaussement significatif. Les 22 % restants sont compris dans l'intervalle d'incertitude et sont considérés comme stables. On note une grande variabilité, avec une amplitude des valeurs observées de 18 m (de -8 à +10 m).

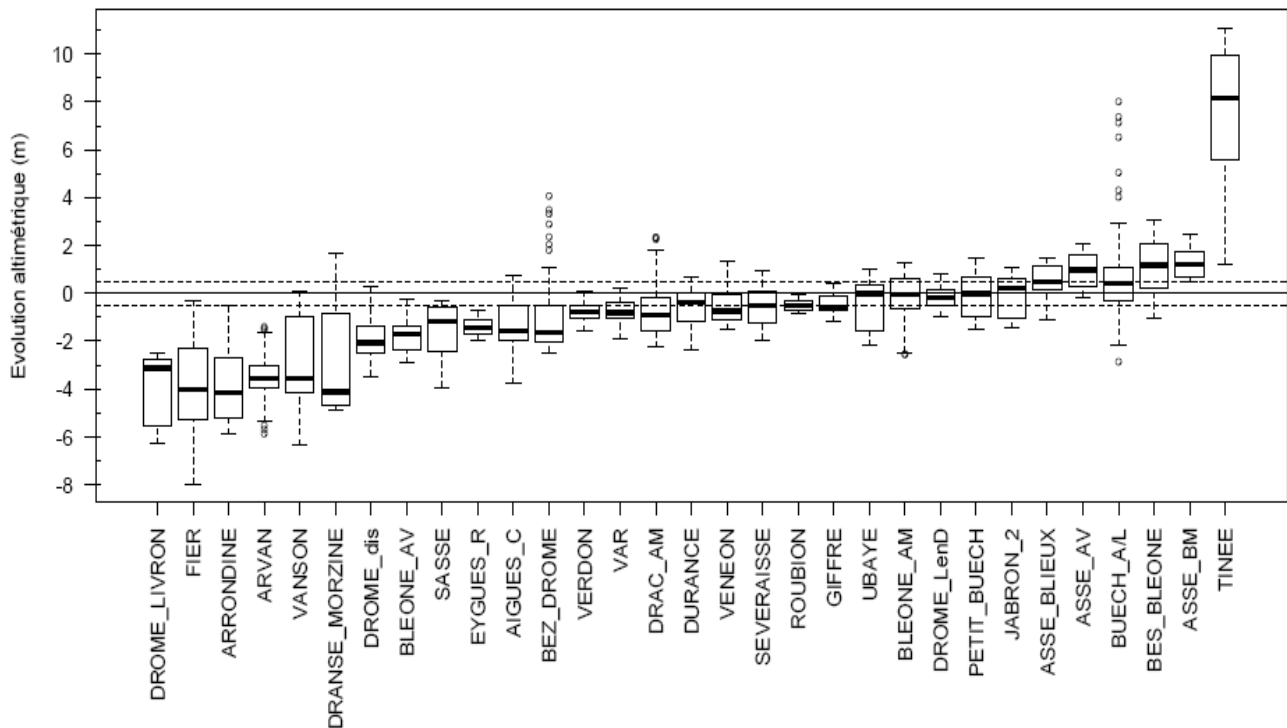


Figure 6. Distributions statistiques de l'évolution altimétrique reconstituée sur les différents sites d'étude ; les traits discontinus correspondent au seuil de détection du changement altitudinal ; les boîtes correspondent à l'intervalle interquartile ; la position de la médiane est indiquée à l'intérieure des boîtes, les moustaches représentent 1,5 fois l'intervalle interquartile

La distribution géographique des régimes sédimentaires montre que toutes les rivières en exhaussement se situent dans les Alpes du Sud (Fig. 9 et 10). Les valeurs moyennes d'exhaussement s'échelonnent entre 0,53 m pour l'Asse de Blieux et 7,5 m pour la Tinée. Dans cette région, des rivières présentent aussi de fortes valeurs moyennes d'incision comme le Vanson avec -3,12 m et la Drôme de Livron avec -4 m. Dans les Alpes du Nord, les rivières sont toutes en incision. Les rivières les plus incisées sont le Fier, l'Arrondine et l'Arvan avec des incisions moyennes respectives de -4,0, -3,8 et -3,5 m (Fig. 11).

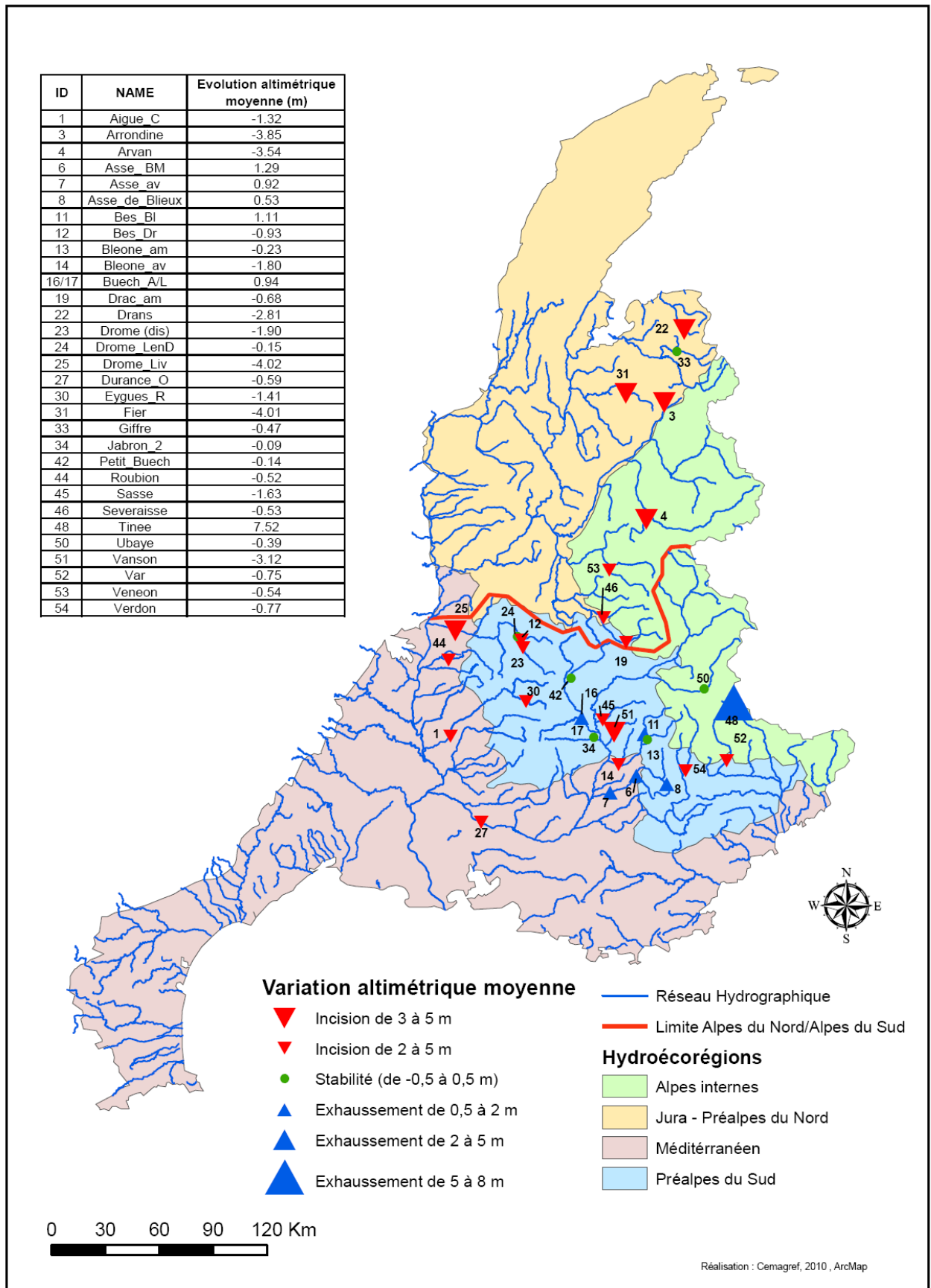


Figure 7. Carte de la répartition spatiale des évolutions altimétriques observées sur un siècle



Figure 8. Rivière en exhaussement des Alpes du Sud : l'Asse près de Mézel (Asse\_BM) (N. Talaska)



Figure 9. Rivière en incision des Alpes du Nord : le Fier près de Dingy-Saint-Clair (N. Talaska)

Le régime sédimentaire est contrôlé par la charge en sédiments grossiers. Trois facteurs permettent de caractériser l'importance de ces apports : les sources de versants (torrents actifs), l'érosion latérale et les sites d'extraction de graviers. Considéré de manière indépendante, chaque facteur présente une relation forte avec l'évolution altitudinale moyenne du profil en long (Fig. 12A, B et C). Les tests statistiques non paramétriques (Kruskall-Wallis) confirment pour chaque facteur une influence sur l'évolution altitudinale (Tab. 3).

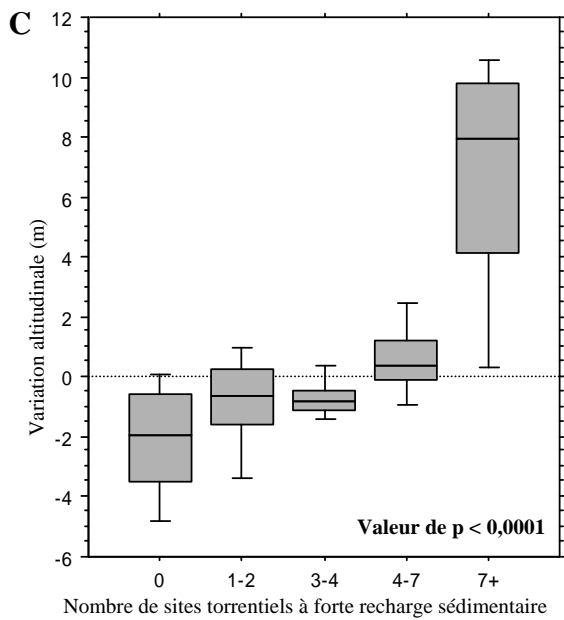
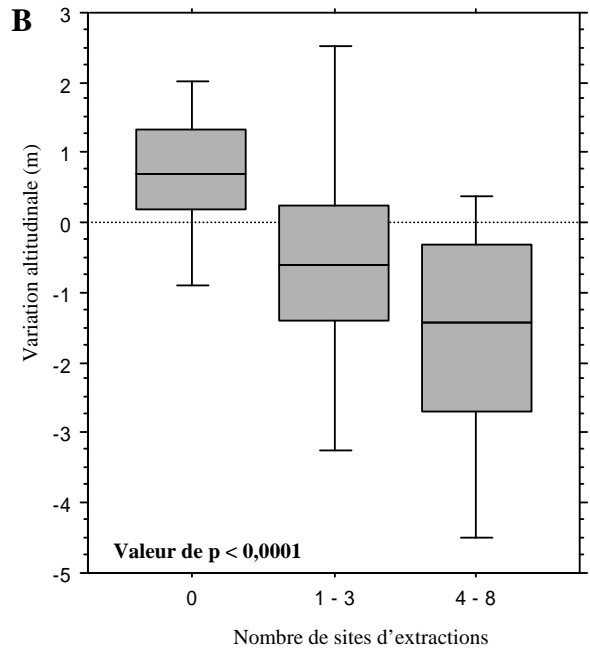
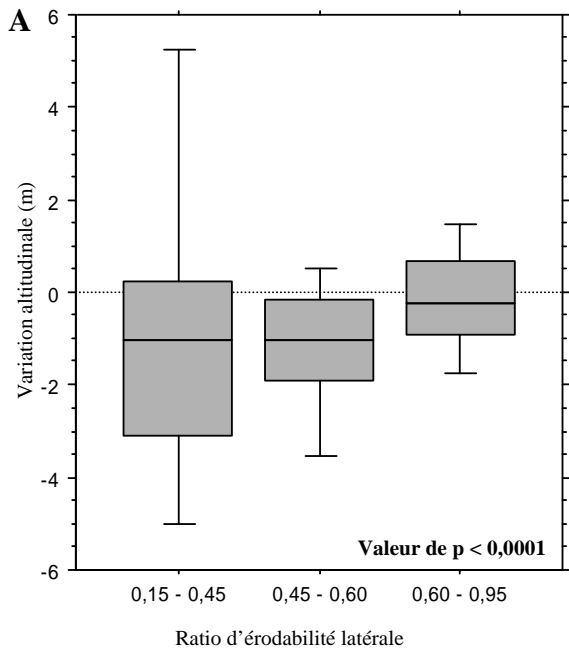


Figure 10. Influence des forçages sédimentaires sur l'évolution altitudinale moyenne du profil en long (A) L'érosion latérale (B) Les extractions (C) Les sources de versants



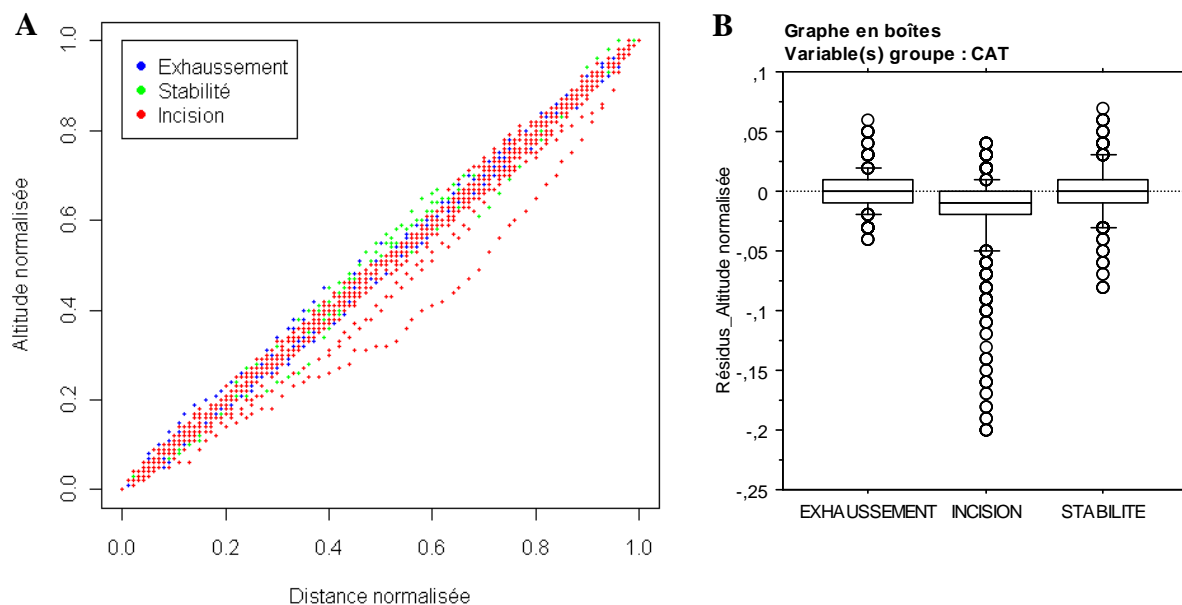


Figure 11. (A) Forme des différents profils en long récents normalisés et (B) distribution statistique des valeurs de l'indice de forme F

#### 4.2.2. Géométrie transverse

Parmi l'ensemble des variables étudiées, certaines ont montré des différences significatives permettant de discriminer les tresses en exhaussement de celles en incision.

La dénivellation entre l'altitude moyenne de la bande active et celle des chenaux en eau ( $H_{ba}$ ) présente une différence significative ( $p=0,0158$  ; test U de Mann-Whitney) entre les rivières incisées et exhausées (Fig. 14). Les chenaux en eau des rivières en incision sont donc plus enfoncés dans la bande active que ceux des rivières en exhaussement. Pour les rivières stables, les valeurs chevauchent celles des catégories d'incision et d'exhaussement.

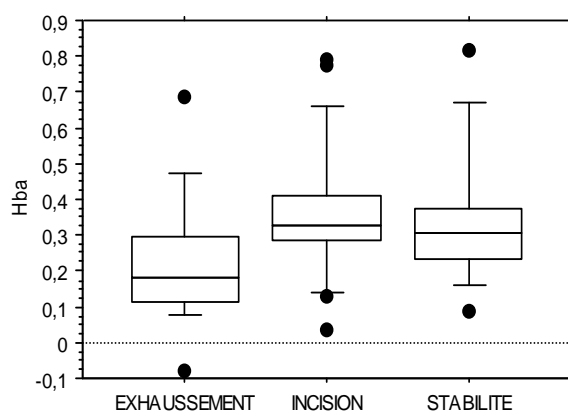


Figure 12. Distribution statistique de la variable  $H_{ba}$  pour les différents régimes sédimentaires

Ce phénomène d'enfoncement des chenaux en eau dans les bandes de tressage incisées s'observe aussi par rapport à d'autres unités morphologiques comme les bancs végétalisés et les terrasses. Pour les

rivières en incision, un système d'étagement est donc visible (Fig. 15A). Pour les rivières en exhaussement, la dénivellation entre les différentes unités de la bande de tressage est faible (Fig. 15B).

Cette observation permet d'expliquer une submersion moins fréquente des bancs dans les tresses incisées, qui ont donc tendance à se végétaliser et à se rétracter. Ce mécanisme a été déjà mentionné pour expliquer la rétraction des bandes actives observée dans les torrents des Préalpes du Sud, interprétée comme une conséquence de l'incision des lits (Liébault and Piégay, 2002).



Figure 13. (A) Système d'étagement observé dans un secteur incisé de la Bléone amont ; au premier plan, le chenal en eau puis successivement les bancs non végétalisés et la terrasse boisée ; (B) dénivellation faible entre les différentes unités de la bande de tressage observé dans un secteur exhausé de la Bléone amont (N. Talaska)

L'étude de la largeur de la bande active normalisée ( $W^*$ ) a mis en évidence une occupation significativement plus importante de la bande active dans sa bande naturelle pour les cours d'eau en exhaussement ( $p=0,0221$  ; test U de Mann-Whitney) (Fig. 16). Ceci rejoint et confirme l'observation précédente (les tresses exhausées se rétractent moins).

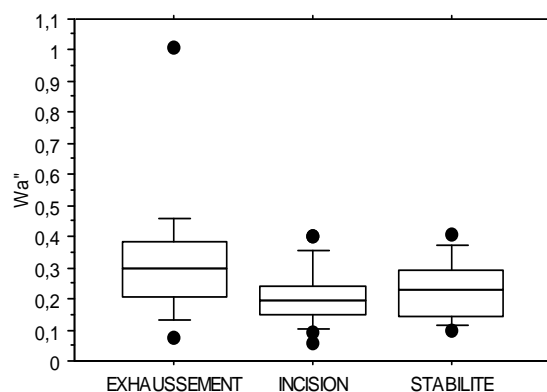


Figure 14. Distribution statistique de la variable  $W^*$  pour les différents régimes sédimentaires

Les indices de rugosité montrent des résultats mitigés quant à la discrimination des tresses incisées et exhausées. L'indice de rugosité de Smith diminue selon un gradient amont-aval (Fig. 17). Ce gradient déjà démontré par Smith traduit le changement des types de bancs d'amont en aval. A l'amont, il y a une dominance des bancs longitudinaux qui confère au profil en travers plus de relief. Vers l'aval, la

proportion de ces bancs diminue au bénéfice des bancs transversaux qui présentent des profils avec moins de relief (Smith, 1970).

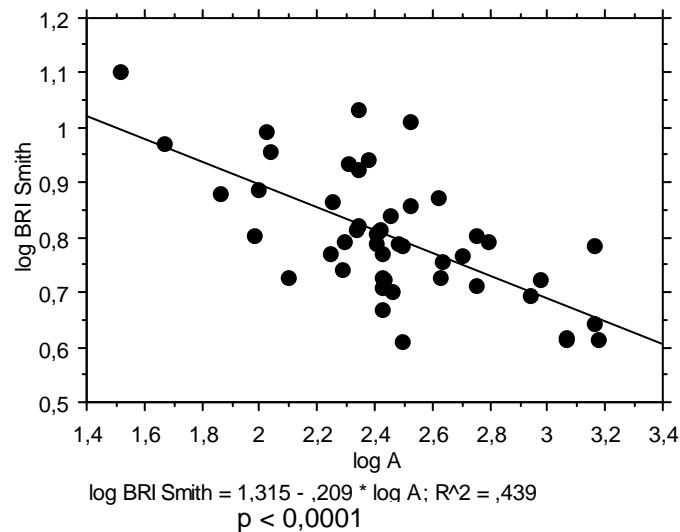


Figure 15. Relation entre le BRI de Smith et la superficie drainée (A)

Les valeurs de cet indice ne diffèrent pas significativement entre les différentes catégories de tresses, tout comme celui de Hoey et Sutherland. Ceci corrobore les résultats obtenus en canal expérimental par (Germanoski and Schumm, 1993). Ils ont démontrés qu'en règle générale, le BRI de Smith des rivières en tresses en incision et en exhaussement augmente par rapport à la valeur en stabilité. Pour les rivières en exhaussement, le relief augmente car il y a création de nouveaux bancs; en incision il est augmenté par l'incision du chenal principal dans les bancs.

L'étude de la largeur des différentes unités (chenaux et bancs) n'a pas montrée de différence significative entre les différentes tresses. Dans les études expérimentales en canal, l'augmentation moyenne de la taille des bancs est cependant décrite comme un indicateur morphologique solide des situations d'incision dans les lits graveleux (Germanoski and Schumm, 1993). Ainsi, cette observation ne semble pas être perceptible en étudiant les profils en travers. Une cartographie en plan des unités sur l'échelle d'un tronçon permettrait peut-être d'aboutir à une telle conclusion.

La non linéarité de l'évolution altitudinale des profils en long dans le temps explique la difficulté à définir des indices morphométriques robustes de prédiction du régime sédimentaire. L'étude diachronique du profil en long compare un état initial à un état final mais ne permet pas de mettre en évidence les fluctuations entre les deux états mesurés. Or dans la présente étude, l'analyse diachronique porte sur un pas de temps séculaire. Ainsi, une rivière décrite comme incisée par l'étude diachronique peut être en cours d'exhaussement sans avoir atteint l'état initial et inversement. Cette rivière présentera donc une morphologie caractéristique d'un régime sédimentaire excédentaire alors qu'elle a tendance à s'inciser sur le temps long.

#### 4.2.3. Granulométrie de surface

En collectant des données granulométriques, nous attendions de pouvoir différencier nettement les différents types de régimes sédimentaires en faisant l'hypothèse d'une granulométrie plus grossière en contexte d'incision. En-effet, le pavage du lit qui caractérise les régimes déficitaires se traduit par une augmentation de la taille des particules de surface.

L'examen des distributions granulométriques ne révèlent pas de différences significatives entre les trois types de régimes sédimentaires (Fig. 18). De même que pour l'analyse des distributions dans chaque espace de la bande alluviale (transect entier, bande active et semi-active). La catégorisation des tronçons repose sur l'analyse diachronique des profils en long à un pas de temps séculaire. Il est possible que la granulométrie réponde plus rapidement aux changements de régime sédimentaire alors que le profil en long s'ajuste sur un temps plus long. La granulométrie révèle peut-être des changements récents de régime sédimentaire non pris en compte dans l'analyse diachronique au pas de temps séculaire.

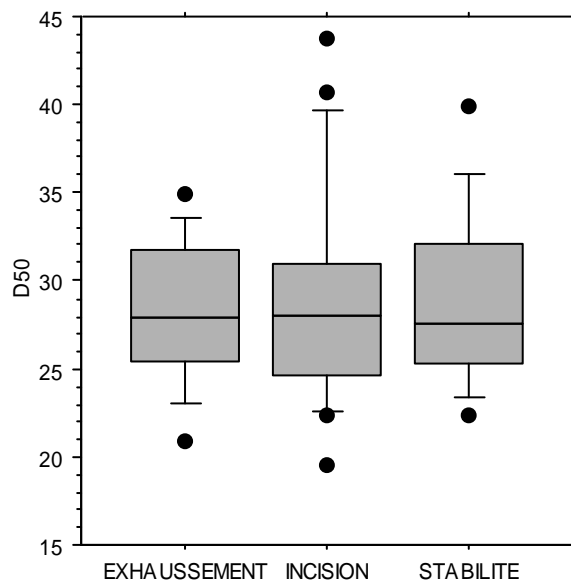


Figure 16. Distribution de la taille médiane des particules selon la catégorie du transect

## 5. Conclusions et perspectives

Cette étude a permis de montrer que la majorité (56%) des tresses du bassin Rhône-Méditerranée présente une tendance à l'incision à l'échelle du siècle, ce qui traduit un bilan sédimentaire déficitaire. Les exportations solides grossières (transport solide par charriage et prélèvements) n'ont pas été compensées par les apports en provenance des berges et des torrents. Ces situations sont plus fréquentes dans les Alpes du Nord où les pressions anthropiques (hydroélectricité, urbanisation des fonds de vallée) ont été plus fortes comparativement aux Alpes du Sud. Ceci explique d'ailleurs pourquoi les tresses se font beaucoup plus rares dans le nord, la plupart ayant disparu sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau et des extractions de graviers (Peiry et al., 1994; Piégay et al., 2009).

L'analyse des forçages confirme l'influence des extractions de graviers et de la mobilité latérale sur l'évolution du profil en long. Les tresses qui maintiennent un régime sédimentaire en équilibre ou excédentaire sont celles sur lesquelles les prélèvements ont été les plus faibles (d'après les traces laissées par les anciennes carrières dans le paysage) et où le potentiel de divagation latérale a été le mieux préservé. L'exemple le plus frappant est sans doute celui des basses vallées de l'Asse et de la Bléone, qui montrent des évolutions altitudinales très différentes (incision en Bléone et exhaussement sur l'Asse) dans un contexte physique quasi identique. L'explication se trouve dans l'urbanisation beaucoup plus prononcée en Bléone (Malijai, Digne-les-Bains) qui s'est traduite par des prélèvements et aménagements plus importants. Tout ceci est déjà bien connu et cette étude ne fait que renforcer à l'échelle régionale les conclusions des investigations conduites à l'échelle d'une vallée (Gautier, 1994; Landon et al., 1998; Marston et al., 2003; Miramont et al., 1998; Piégay and Peiry, 1997). En revanche, notre analyse montre statistiquement l'importance des forçages torrentiels sur la trajectoire morphologique des tresses, une idée exprimée dans plusieurs études (Landon et al., 1998; Liébault et al., 2008) mais qui n'était pas vraiment consolidée par des statistiques robustes. Il est intéressant de constater que seule la prise en compte des torrents les plus actifs (ceux ayant un impact visible sur la morphologie du cours d'eau principal) permet de mettre en évidence un effet sur l'évolution altimétrique séculaire des tresses. Ces torrents étaient beaucoup plus nombreux au début du siècle. Ceci renforce la conclusion selon laquelle l'extinction de l'activité des torrents sous l'effet combiné de la reconquête forestière des versants, des travaux RTM et du réchauffement climatique post-PAG a contribué à accélérer la disparition du tressage dans les Alpes.

Aujourd'hui, les extractions en lit mineur sont interdites depuis la loi sur l'eau de 1992. Seules les extractions nécessaires à la sécurité des biens et des personnes sont autorisées selon une réglementation stricte (durcie avec la directive cadre sur l'eau et son application française avec la directive no. 2006-1772 et la réforme de la nomenclature sur l'eau) comme par exemple sur le Petit-Buëch (Fig. 19). Une idée courante est d'admettre que cette réglementation sera suffisante pour obtenir un rehaussement spontané des tresses incisées. Cette étude montre que ce ne sera pas le cas partout car les conditions de recharge sédimentaire ne sont pas toujours favorables. On peut prendre en exemple la basse vallée de la Drôme, le Fier, le Giffre ou la Dranse de Morzine. Toutes ces tresses sont fortement incisées et leur potentiel de recharge sédimentaire de proximité est faible. Dans de tels cas, il apparaît souhaitable de n'autoriser les curages qu'à de très rares exceptions et de promouvoir la restauration d'un espace de liberté, le soutien de la recharge sédimentaire et la préservation de la continuité du transport solide. Inversement, d'autres rivières semblent mieux armées pour restaurer spontanément leur profil en long. Il s'agit notamment de l'Ubaye, de la basse vallée de la Bléone, de l'Arrondine, de l'Arvan et de la Sasse. Malgré une incision forte à l'échelle du siècle, la recharge sédimentaire actuelle semble suffisamment préservée pour garantir un rehaussement du lit. On retrouve d'ailleurs dans certaines de ces rivières des indices morphologiques qui montrent que cette restauration est en cours (faible encaissement des chenaux dans les bancs, présence de nappes de charriage). Un dernier cas de figure est celui des tresses exhausées qui maintiennent un fort potentiel de recharge sédimentaire. On peut citer à titre d'exemple la Tinée, la basse vallée de l'Asse ou encore le Bès Bléone. On peut imaginer ici une plus grande souplesse en matière d'autorisation de curages, à condition que ceux-ci soient clairement destinés à améliorer la sécurité d'enjeux menacés par la formation des engravements.



Figure 17. Extraction de granulats dans le lit du Petit Buëch (N. Talaska)

L'analyse morphologique des tresses a permis de mettre en évidence des liens statistiques entre des indicateurs morphométriques et le régime sédimentaire. Les indicateurs les plus performants sont l'encaissement des chenaux dans la bande de tressage, la présence de convexités marquées sur le profil en long ou encore la largeur normalisée de la bande active. Il faut néanmoins rester prudent sur l'utilisation de ces indicateurs car l'étude repose sur une population statistique de taille modérée et sur des situations morphologiques qui peuvent ne pas être représentatives du régime sédimentaire utilisé pour discriminer les groupes (nous n'avons pas accès à la variabilité dans le temps des réponses morphologiques). L'implémentation d'une approche expérimentale prévue en année 2 du projet permettra d'apporter de nouveaux éléments sur ces questions car il sera possible d'imposer le régime sédimentaire et d'observer selon un pas de temps court l'ajustement morphologique et sédimentaire des tresses.

## 6. Bibliographie

- Ashmore, P.E., 1988. Bedload transport in braided gravel-bed stream models. *Earth Surface Processes and Landforms* 13, 677–695.
- Bravard, J.-P. and Peiry, J.-L., 1993. La disparition du tressage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau (19-20ème siècles). *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band*, 88: 67-79.
- Church, M., 1983. Pattern of instability in a wandering gravel bed channel. In: J.D. Collinson and J. Lewin (Editors), *Modern and ancient fluvial systems*. Special publication of the International Association of Sedimentologists 6. Blackwell, Oxford, pp. 169-180.
- Church, M. and Jones, D., 1982. Channel bars in gravel-bed rivers. In: R.D. Hey, J.C. Bathurst and C.R. Thorne (Editors), *Gravel-bed Rivers*. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 291-338.
- Gautier, E., 1994. Interférence des facteurs anthropiques et naturels dans le processus d'incision sur une rivière alpine: l'exemple du Buëch (Alpes du sud). *Revue de Géographie de Lyon*, 69(1): 57-62.
- Germanoski, D. and Schumm, S.A., 1993. Changes in braided river morphology resulting from aggradation and degradation. *The Journal of Geology*, 101: 451-466.
- Graham, D.J., Reid, I. and Rice, S.P., 2005a. Automated sizing of coarse-grained sediments: Image-processing procedures. *Mathematical Geology*, 37(1): 1-28.
- Graham, D.J., Rice, S.P. and Reid, I., 2005b. A transferable method for the automated grain sizing of river gravels. *Water Resources Research*, 41(7): 1-12.
- Graham, D.J., Rollet, A.-J., Piégay, H. and Rice, S.P., 2010. Maximizing the accuracy of image-based surface sediment sampling techniques. *Water Resources Research*, 46.
- Hoey, T.B. and Sutherland, A.J., 1991. Channel morphology and bedload pulses in braided rivers: a laboratory study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(5): 447-462.
- Landon, N., Piégay, H. and Bravard, J.-P., 1998. The Drôme River incision (France): from assessment to management. *Landscape and Urban Planning*, 43: 119-131.
- Liébault, F. and Clément, P., 2007. La mobilité de la charge de fond des rivières torrentielles méditerranéennes. *Géographie Physique et Quaternaire*, 61(1): 7-20.
- Liébault, F., Gomez, B., Page, M., Marden, M., Peacock, D., Richard, D. and Trotter, C.M., 2005. Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Research and Applications*, 21: 739-756.
- Liébault, F. and Piégay, H., 2002. Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(4): 425-444.
- Liébault, F., Piégay, H., Frey, P. and Landon, N., 2008. Tributaries and the management of main-stem geomorphology. In: S.P. Rice, A. Roy and B.L. Rhoads (Editors), *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 243-270.
- Madej, M.A. and Ozaki, V., 1996. Channel response to sediment wave propagation and movement, Redwood Creek, California, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 911-927.
- Marston, R.A., Bravard, J.-P. and Green, T., 2003. Impacts of reforestation and gravel mining on the Malnant River, Haute-Savoie, French Alps. *Geomorphology*, 55: 65-74.

- Miramont, C., Jorda, M. and Pichard, G., 1998. Evolution historique de la morphogenèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne: l'exemple de la moyenne Durance (France du Sud-Est). *Géographie physique et Quaternaire*, 52(3): 1-13.
- Nicholas, A.P., 2000. Modelling bedload yield in braided gravel bed rivers. *Geomorphology*, 36: 89-106.
- Peiry, J.-L., Salvador, P.-G. and Nougier, F., 1994. L'incision des rivières dans les Alpes du nord: état de la question. *Revue de Géographie de Lyon*, 69(1): 47-56.
- Piégay, H., Alber, A., Slater, L. and Bourdin, L., 2009. Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquatic Sciences*, 71(3): 371-388.
- Piégay, H. and Peiry, J.-L., 1997. Long profile evolution of a mountain stream in relation to gravel load management : example of the middle Giffre River (French Alps). *Environmental Management*, 21(6): 909-919.
- Roberts, R.G. and Church, M., 1986. The sediment budget in severely disturbed watersheds, Queen Charlotte Ranges, British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 16(5): 1092-1106.
- Slater, L., 2007. Caractérisation des rivières en tresses françaises. Unpublished MSc Thesis, ENS Lyon, 57 pp.
- Smith, N.D., 1970. The braided stream depositional environment: comparison of the Platte River with some Silurian clastic rocks, North-Central Appalachians. *Geological Society of America Bulletin*, 81: 2993-3014.