

# Analyse statistique et modélisation de la variabilité longitudinale du gradient granulométrique du Rhône suisse

Antonin Montané<sup>1</sup>, Gilles Arnaud-Fassetta<sup>2</sup> & Emmanuel Reynard<sup>3</sup>

Bull. Murithienne 127/2009: 19-27 (2010)

En raison de son contexte géologique, de son passé glaciaire et de l'importance des apports latéraux, le plancher alluvial du Rhône suisse présente un profil en long marqué par de rapides variations de pente, associées aux élargissements et aux rétrécissements de la plaine alluviale. Cette étude décrit dans un premier temps l'évolution longitudinale de la charge de fond du Rhône, associée au contexte physique du bassin, puis, dans un second temps, deux modélisations statistiques de la charge de fond sont testées en vue de déterminer les facteurs influençant les variations du gradient granulométrique dans le chenal. Ces deux modélisations statistiques permettent d'aborder les concepts de discontinuité locale et longitudinale, utiles à la bonne compréhension de la dynamique fluviale.

**Statistische Analyse und Modellierung des Korngrössengradientes im Längsverlauf der Schweizer Rhone.** – Aufgrund der Geologie, der letzten Eiszeit und der Wichtigkeit der Seitengewässer zeichnet sich die Flussebene der Schweizer Rhone durch ein Längsprofil mit einer raschen Abfolge von unterschiedlichen Neigungen aus, welche mit den Ausweitungen und Verengungen der Flussebene verbunden sind. Die vorliegende Studie beschreibt in einem ersten Schritt die Entstehung der Bodensedimente im Laufe Zeit entlang der Rhone in Abhängigkeit der Morphologie der Talebene. In einem zweiten Schritt werden zwei statistische Modellierungen der Bodensedimente getestet. Damit sollen jene Faktoren bestimmt werden, welche die unterschiedlichen Korngrößen (Granulometrie) im Flussbett beeinflussen. Diese Modellierungen erlauben es, die Variablen der lokalen und longitudinalen Diskontinuität zu erörtern, was für das Verständnis der Flussdynamik von grossem Nutzen ist.

## Mots clés

Géomorphologie fluviale, profil en long, gradient granulométrique, Rhône

## Schlüsselwörter

Fluvial Geomorphologie, Längsprofil, Korngrössengradient, Rhone

1 Université Paris-Diderot (Paris 7), F-75013 Paris; antonin.montane@etu.univ-montp3.fr.

2 Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne (Paris 12), CNRS UMR 8591 (LGP Meudon), F-94010 Créteil; gilles.arnaud-fassetta@univ-paris12.fr.

3 Institut de géographie, Université de Lausanne, Anthropole, CH-1015 Lausanne; emmanuel.reynard@unil.ch

## INTRODUCTION

Il est admis que la granularité de la charge de fond d'un cours d'eau diminue de façon exponentielle vers l'aval (STERNBERG 1875). FRINGS (2007) qualifie cette évolution longitudinale de gradient granulométrique (*downstream fining*), en lui associant trois principaux processus pouvant influencer son évolution : l'usure (KUENEN 1959; LEWIN & BREWER 2002), le transport sélectif (KOMAR 1987; FERGUSON 2005; RECKING 2006) et l'adjonction ou le prélèvement de sédiments (EL KADI 2006). Ainsi, l'analyse du gradient granulométrique sert à comprendre l'évolution longitudinale de la dynamique d'un cours d'eau et ses interactions avec les contraintes physiques locales (géologie, processus hydrogéomorphologiques, affluents) et les activités humaines. Les résultats mis en avant dans les études traitant du gradient granulométrique (RICE 1998; SURIAN 2002; HAMAR & CLIFFORD 2007; WANG & al. 2009) insistent aussi sur le fait que si la granularité des alluvions présentes dans le lit d'une rivière diminue vers l'aval, des irrégularités dans le gradient granulométrique longitudinal sont identifiables grâce à une régression exponentielle de la charge de fond (généralement par l'analyse des distributions du  $D_{90}$  ou du  $D_{50}$ ) en fonction de la distance à la source et, en particulier, grâce à l'étude des résidus à cette régression. On distingue deux types de discontinuité : les discontinuités longitudinales, liées aux variations du profil en long du cours d'eau, et les discontinuités locales, qui proviennent des apports latéraux ou des prélèvements de sédiments. Or, il n'est pas possible de distinguer ces deux types de discontinuité par le biais d'une régression exponentielle. L'objectif de cet article, qui est issu d'un mémoire de master 2 (MONTANÉ 2009), est dans un premier temps d'étudier l'évolution longitudinale de la granularité de la charge de fond du Rhône suisse, de sa source au Lac Léman. Les résultats statistiques sont comparés à ceux obtenus dans la même étude sur le cours français du fleuve. Dans un second temps, sont effectués deux types de modélisation, l'une s'appuyant sur la régression exponentielle et l'autre sur la régression linéaire multiple. Seul le recours à ces deux types de modélisation permet de véritablement caractériser les discontinuités longitudinales et locales du gradient granulométrique.

## SECTEURS D'ÉTUDE

Le Rhône suisse a un tracé long de 165 km orienté d'abord vers le SW puis vers le NW dans son tiers inférieur. Le chenal rhodanien est très encaissé par rapport aux sommets environnants car il s'inscrit dans une vallée glaciaire dont la morphologie est fortement influencée par les différentes lithologies rencontrées. Dans la partie

amont de sa vallée, le Rhône est dominé par les massifs cristallins externes de l'Aar-Gothard puis s'écoule le long de la ligne de suture entre les nappes penniques au sud et les nappes helvétiques au nord. Dans la partie aval de sa vallée, à hauteur de Martigny, le fleuve traverse perpendiculairement les massifs externes et les nappes préalpines du Chablais avant de rejoindre le Lac Léman dans lequel il a construit son delta. La pente moyenne du profil en long est forte (9%) et les nombreux affluents rejoignent le Rhône soit par des cônes torrentiels, soit par des gorges de raccordement sous-glaciaires, à l'exception de la Viège et de la Dranse où le raccordement se fait dans la plaine alluviale. Toute la vallée du Rhône suisse est soumise à des phénomènes de réajustement postglaciaire très actifs (tassements, glissements de terrain, laves torrentielles, ...) qui contribuent à fournir une quantité non négligeable de sédiments au fleuve (REYNARD & al. 2009). Aujourd'hui, l'hydrographie de la vallée est très largement artificialisée dans ses deux tiers aval par la rectification et de chenalisation du Rhône, qui ne sont interrompues que dans le secteur situé en aval du cône de l'Illgraben.

## MÉTHODES

Ce travail est essentiellement basé sur l'analyse statistique de mesures granulométriques et pétrographiques faites sur le terrain. Nous ne présentons ici que les données concernant le Rhône suisse. L'étude a été réalisée à deux moments différents : l'essentiel des données a été obtenu lors d'une campagne de mesures conduite en juillet 2008 ; un site a fait l'objet d'un échantillonnage complémentaire en janvier 2009 (MONTANÉ 2009). La granulométrie des alluvions a été mesurée sur tout le tracé du Rhône, là où les bancs latéraux étaient accessibles à pied. Ainsi, nous avons mesuré environ 650 blocs, galets et/ou graviers répartis sur six sites numérotés de 1 à 6 vers l'aval, entre le glacier du Rhône et le Lac Léman (**fig. 1**). La taille des alluvions a été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse ou d'un décimètre pour les éléments de plus de 25 cm de diamètre, au niveau des unités sédimentaires situées au sommet (soit au niveau du pavage) des bancs latéraux (**fig. 2**). Sur chaque site, plus d'une centaine de blocs-galets-graviers a été mesurée puis classée par ordre croissant de taille. Le 9<sup>e</sup> décile ( $D_{90}$ ), qui sépare les 90 % inférieurs des particules des 10 % supérieurs, a été extrait de la distribution granulométrique. C'est ce décile qui a été retenu afin de comparer les sites entre eux. En plus du  $D_{90}$ , sur chaque site ont été quantifiées 8 variables physiques ( $E$  : altitude;  $D_s$  : distance à la source;  $S$  : pente hydraulique locale;  $d_{max}$  : profondeur maximale du chenal;  $\omega$  : puissance spécifique;  $W_{ac}$  : largeur de la bande active de tressage;  $BI$  : indice de tressage,  $W_c/W_{ac}$  : rapport largeur

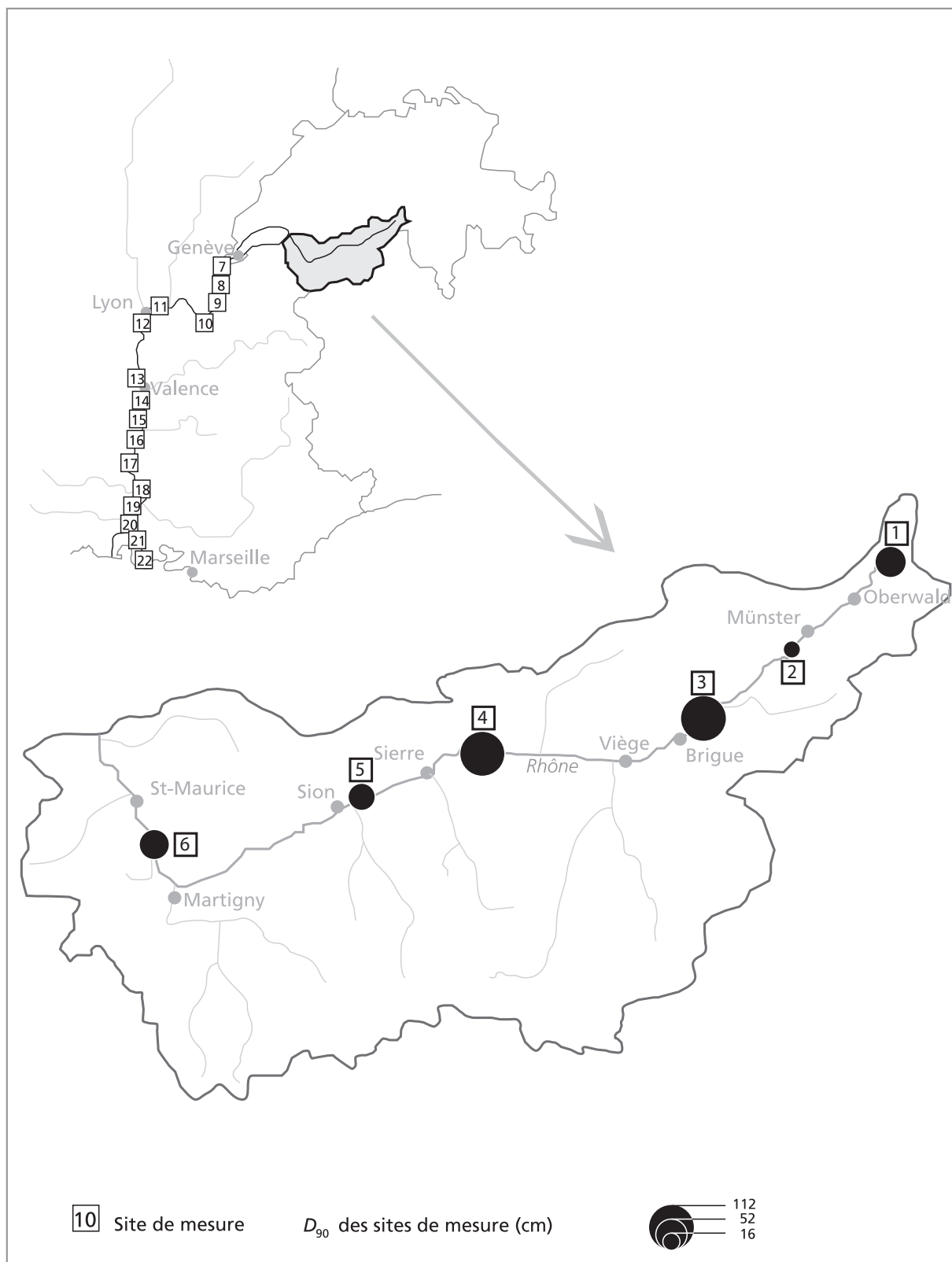


FIGURE 1 – Situation des sites d'étude (numérotés de 1 à 6) et valeurs du  $D_{90}$  des alluvions mesurées sur le Rhône suisse. Sont également indiqués les sites de prélèvement sur le Rhône français.

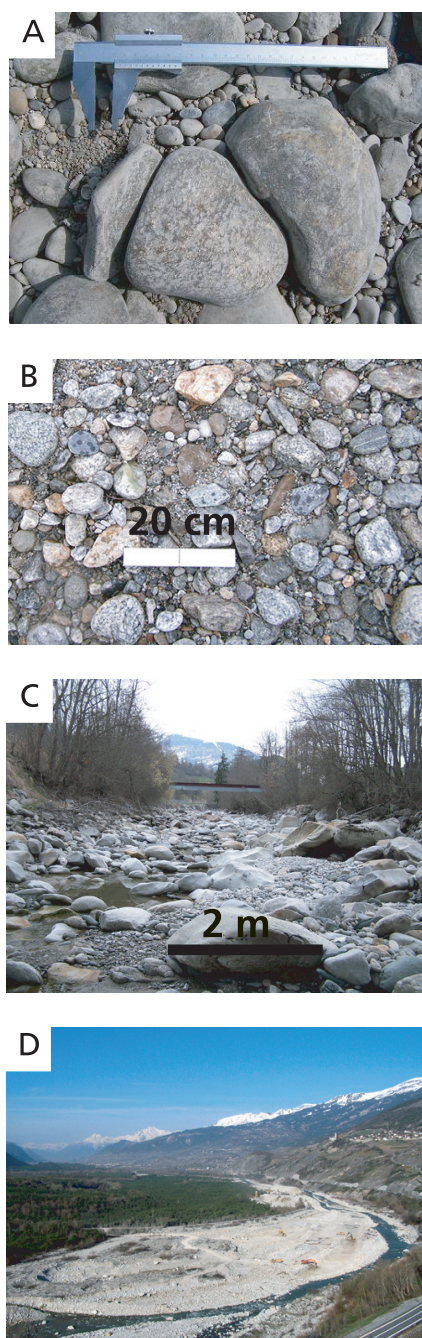


FIGURE 2 – Méthodes de mesure de la charge de fond et granularité des alluvions. A: mesure au pied à coulisse. B: granulométrie au site 2 (vallée de Conches). C: granulométrie au site 3 (gorges sous-glaciaires). D: la bande active de tressage du Rhône en aval du cône de l'Illgraben (site 4).

du chenal en eau/largeur de la bande active de tressage) explicatives de la nature et de la répartition de la charge de fond, par le biais de l'analyse statistique et de la modélisation hydromorphosédimentaire. Les données morphométriques et hydrauliques ont été quantifiées à partir des cartes topographiques et géologiques et des données fournies par les travaux de la 3<sup>e</sup> Correction Rhône du Canton du Valais. Le gradient granulométrique a été caractérisé par une première analyse statistique, qui a consisté en une régression exponentielle du  $D_{90}$  en fonction de la distance à la source (STERNBERG 1875; SURIAN 2002; MOUSSAVI-HARAMI & al. 2004), puis par une seconde analyse statistique basée sur une régression linéaire multiple intégrant les huit variables que l'on considère comme explicatives :  $E$ ,  $D_s$ ,  $S$ ,  $d_{max}$ ,  $W_{acr}$ ,  $BI$  et  $W_c/W_{ac}$ .

## DESCRIPTION MORPHOSÉDIMENTAIRE DES SITES DE MESURE

Chacun des sites de mesure le long du Rhône a ses propres caractéristiques morphosédimentaires. Les six sites présentent une charge sédimentaire grossière, avec des variations brutales qui doivent être mises en relation avec le profil en long du Rhône valaisan (fig. 3). En plus d'être grossiers, les débris constituant les bancs latéraux sont relativement anguleux, ce qui signifie que ceux-ci sont proches de leur zone d'arrachement d'origine et qu'ils n'ont été transportés que sur de courtes distances. La vallée du Rhône est caractérisée également par une succession d'élargissements et de rétrécissements de la plaine alluviale (fig. 4). Influençant l'énergie du cours d'eau au même titre que le volume et la taille des apports latéraux, ces variations de la géométrie de la plaine alluviale sont déterminantes dans la distribution longitudinale de la granularité de la charge de fond du Rhône.

Les différents sites de mesure sont présentés dans le tableau 1.

## RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

### Régression exponentielle

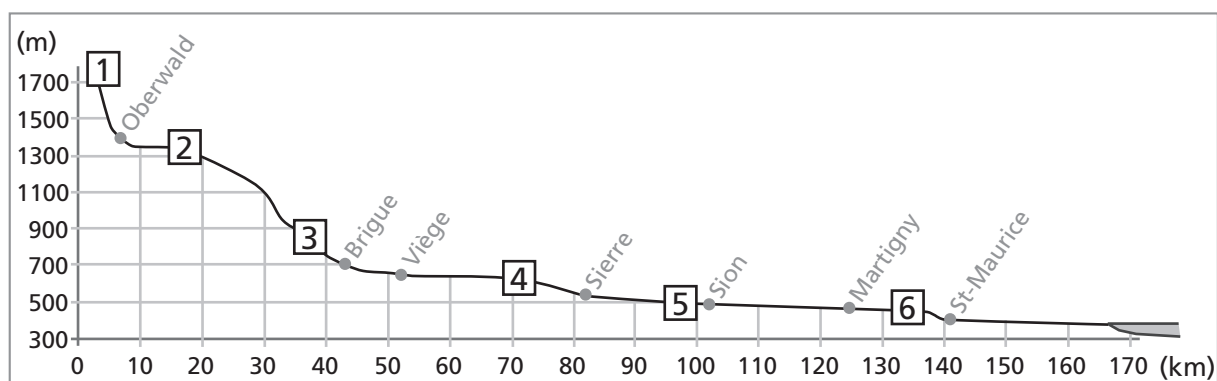
Les résultats de la régression exponentielle du  $D_{90}$  en fonction de la distance à la source sont présentés à la figure 5. La régression exponentielle est significative avec un  $R^2$  de 0,514, mais près de la moitié de la variance n'est toutefois pas prise en compte par la régression. Les sites du Rhône suisse (1 à 6) sont, pour certains, très éloignés de l'estimation de la régression, alors que les sites du Rhône français (points gris) semblent davantage suivre la courbe. Les sites suisses ont donc des résidus, positifs ou négatifs, importants (fig. 5 et 6).

Les sites 1 et 2 ont des résidus fortement négatifs (18 et 50 cm), qui s'expliquent par les pentes relativement faibles de ces deux sites inscrits dans des ombilics glaciaires. Le site 3 présente la situation inverse. En effet, le résidu, positif de 52 cm par rapport à la régression exponentielle, s'explique par les fortes pentes dans les gorges sous-glaciaires en amont de Brigue. Le site 4, avec un résidu positif de 53 cm, a des caractéristiques très proches du site 3. Les apports sédimentaires du torrent de

l'Ilgraben sont à l'origine de cette augmentation brutale de la granularité. Les sites 5 et 6 ne présentent pas de résidus significatifs comparativement aux autres sites du Rhône suisse, bien que le site 6 soit directement conditionné par les apports sédimentaires du torrent du Saint-Barthélemy.

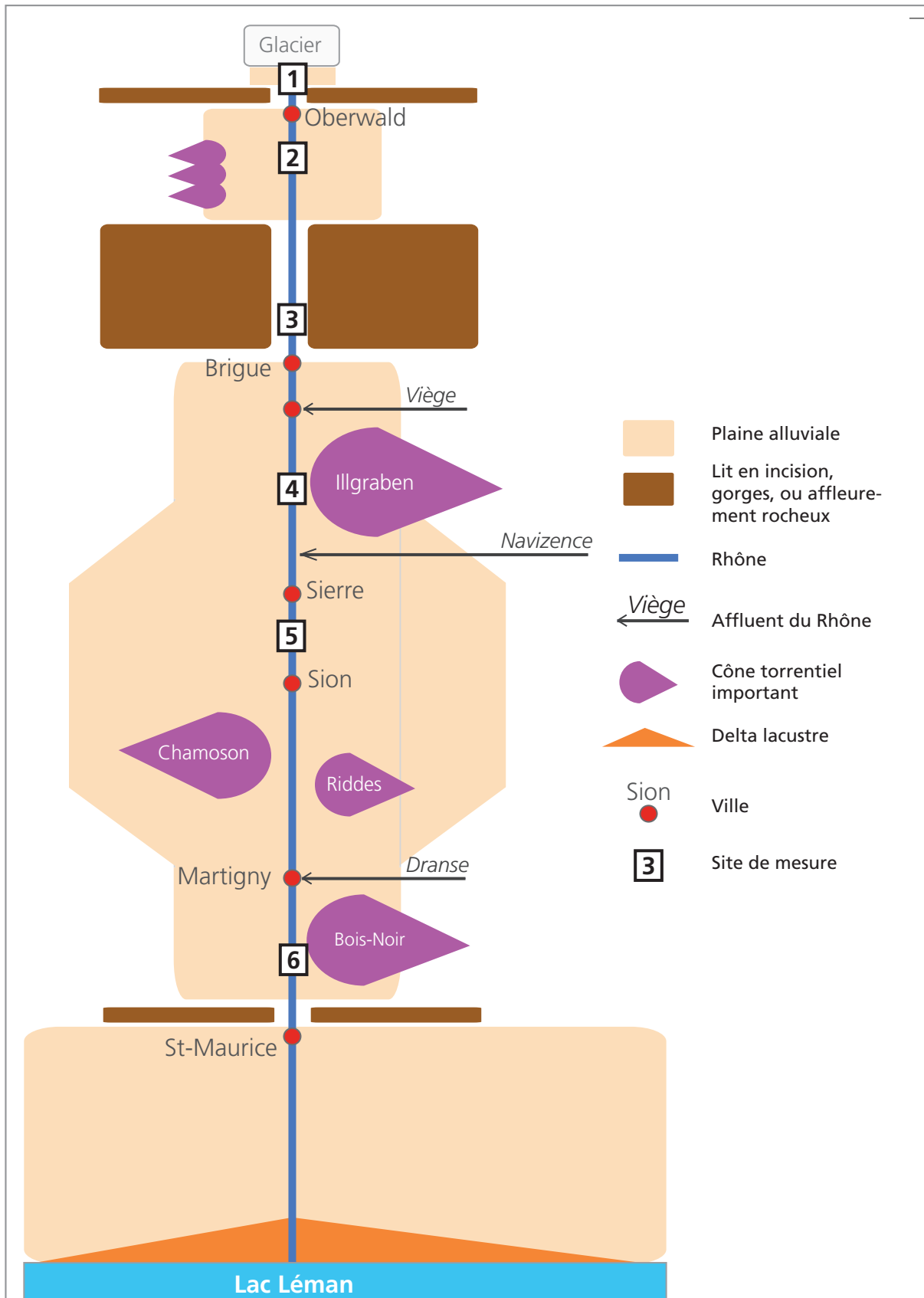
Contrairement aux résultats avancés dans les travaux de SURIAN (2002) et de MOUSSAVI-HARAMI & al. (2004) ainsi que ceux obtenus sur le Rhône français (MONTANÉ 2009), nous pouvons conclure que la distance à la source ne permet pas d'expliquer la variance (c'est-à-dire la variabilité longitudinale de la granularité de la charge de fond) du Rhône suisse.

FIGURE 3 – Profil en long du Rhône suisse. Les chiffres indiquent la position des sites de mesure.



Site	Contexte morphosédimentaire	D <sub>90</sub> (cm)	distance depuis la source (km)	pente (‰)	largeur bande active (m)	altitude (m)	largeur en eau / BA	puiss. spec. (W · m <sup>-2</sup> )	Indice de tressage	prof. max (m)
1	Auge glaciaire de Gletsch	51.5	2.5	15.34	28	1768	0.43	146.3	0.3	3
2	Auge glaciaire de la vallée de Conches	15.6	16	4.94	34	1335	0.41	60.3	0	8
3	Gorge sous-glaciaire, en amont de Brigue	111.5	47	22.44	33	763	0.61	991.5	0.3	6.8
4	Remblaiement post-glaciaire, apports du torrent de l'Ilgraben	107	75	12.65	250	600	0.22	65.3	1.1	5.7
5	Remblaiement post-glaciaire, Rhône déconnecté des apports latéraux	39	95	3.41	53	510	0.91	255.9	0	5.2
6	Remblaiement post-glaciaire, apports du torrent du Saint-Barthélemy	48.8	140	4.91	52	410	0.73	526.2	0	9.5

TABLEAU 1 – Sites de mesure et détail des huit variables descriptives.



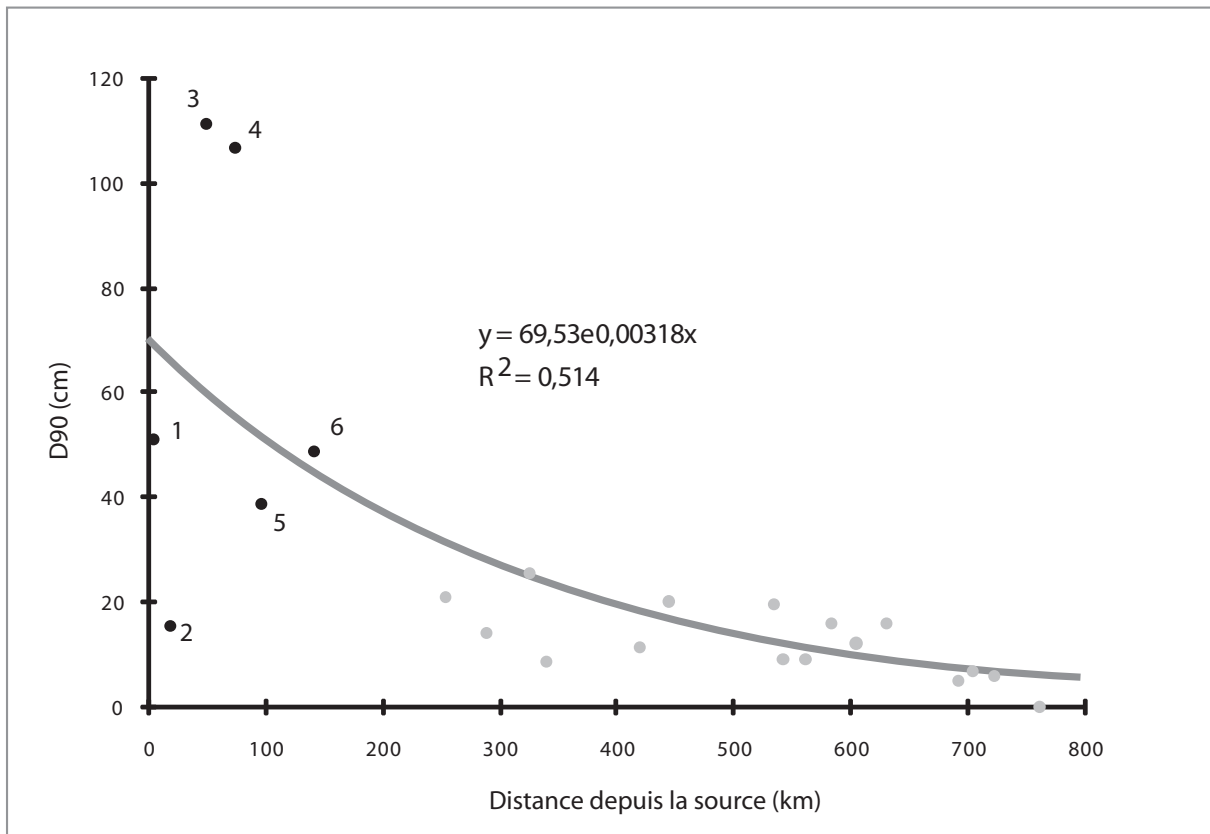
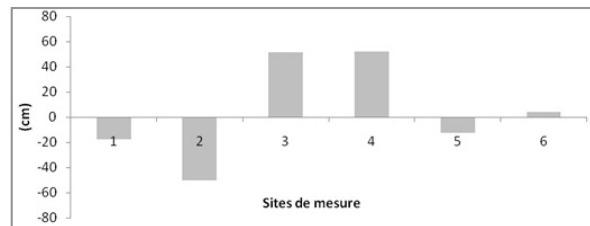


FIGURE 4 (p. 24)– Modifications de la largeur de la plaine alluviale du Rhône suisse et rôle des apports latéraux.

FIGURE 5 – Régression exponentielle et résidus. Les points noirs représentent les sites en amont du Lac Léman alors que les points gris font référence aux sites étudiés sur le cours français du Rhône.

FIGURE 6 – Résidus à la régression exponentielle.



### Régression linéaire multiple

Afin de distinguer les discontinuités locales et longitudinales du gradient granulométrique, nous avons procédé à une régression linéaire multiple, qui a pour fonction d'analyser les liens entre la variable dépendante quantitative à expliquer ( $D_{90}$ ) et les différentes variables quantitatives indépendantes.

Une régression linéaire multiple de type «stepwise» a été réalisée sur les huit variables présentées plus haut. Le  $D_{90}$  est pris en compte en tant que variable dépendante et les 8 autres variables sont les variables explicatives. Nous avons choisi un intervalle de confiance de 95 % et une probabilité de 0,05 pour la prise en compte ou pas des variables. Le **tableau 2** expose la synthèse de la sélection des variables.

Nbre de variables	Variables	Entrée variable	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté
1	S	S	0,810	0,800
2	S/E	E	0,853	0,838
3	S/E/D <sub>s</sub>	D <sub>s</sub>	0,922	0,909
4	S/E/D <sub>s</sub> /ω	ω	0,940	0,926

TABLEAU 2 – Synthèse de la sélection des variables dans la régression multiple (E : altitude; D<sub>s</sub> : distance à la source; S : pente hydraulique locale; ω : puissance spécifique).

La première variable sélectionnée est la pente, qui explique à elle seule 81 % de la variance de la granularité. L'ajout de l'altitude (E), de la distance à la source (D<sub>s</sub>) et de la puissance spécifique (ω) donne un R<sup>2</sup> ajusté de 0,926, soit la quasi-totalité de la variance. Les variables choisies ont un coefficient de corrélation (R<sup>2</sup>) entre elles qui dépasse pour beaucoup 0,5. Cependant, étant donné le nombre de sites assez faible pour ce genre d'étude,

nous considérons que l'interdépendance entre les variables est acceptable. La pente hydraulique ( $S$ ) apparaît ici comme la variable la plus importante de la régression multiple.

Le modèle suit relativement bien les variations du  $D_{90}$  (fig. 7), contrairement à la régression exponentielle (fig. 5). Les résidus des sites 1 et 2 étaient largement négatifs avec la régression exponentielle (fig. 5), notamment pour le site 2 (50 cm), alors que pour ce même site, le résidu à la régression multiple est légèrement positif de 4 cm avec la régression linéaire multiple. La prise en compte de la faible valeur de  $S$  sur ce site (4,9%) permet de bien meilleures estimations que la régression exponentielle. Le site 3 se trouve dans les gorges sous-glaciaires avec un  $D_{90}$  élevé (111 cm) correspondant à une charge de fond à blocs. L'augmentation rapide de  $S$  est prise en compte par la régression multiple et le résidu n'est négatif que de 7 cm (fig. 7), contre un résidu positif de 52 cm pour la régression exponentielle (fig. 5). Les sites 4 et 6 ont en commun de se situer directement en aval de cônes torrentiels (Illgraben, Bois-Noir) qui apportent des sédiments grossiers, notamment lors d'événements de lave torrentielle. Le modèle issu de la régression linéaire multiple (fig. 7) ne prenant pas en compte ces apports latéraux, nous obtenons des résidus relativement élevés (respectivement 14 cm et 13 cm) par rapport aux autres sites du Rhône suisse.

## CONCLUSIONS

L'objectif de cette étude était de caractériser la variabilité longitudinale de la charge de fond du Rhône suisse sur la base de prélèvements effectués sur six sites répartis du glacier du Rhône au Lac Léman, et d'expliquer ces caractéristiques par l'intégration de plusieurs indicateurs dans l'analyse statistique. Il s'agissait également de comparer les résultats obtenus sur les six sites suisses avec seize relevés effectués sur le Rhône français, du Lac Léman à la Méditerranée (MONTANÉ 2009). Le présent article n'a fait état que des résultats obtenus sur le Rhône suisse. La régression exponentielle, qui devait permettre d'expliquer la variabilité de la charge de fond du Rhône par la distance à la source n'est valable que pour le cours français du Rhône (MONTANÉ, 2009); elle ne l'est pas pour le Rhône alpestre (suisse). Sur ce dernier tronçon, la variabilité de la charge de fond est beaucoup trop forte en raison de l'irrégularité marquée du profil longitudinal du fond de vallée ainsi que de l'abondance de la fourniture sédimentaire provenant latéralement des affluents (laves torrentielles) et des versants (glissements de terrain, coulées de débris). La régression linéaire multiple, qui a fait intervenir successivement les variables géographique ( $D_s$ ), topographique ( $E$ ) et hydrauliques ( $S$ ), a permis d'expliquer près de 93 % de la variance (c'est-à-dire de la variabilité longitudinale de la granularité de la charge de fond). Il est donc possible de conclure que le gradient gra-

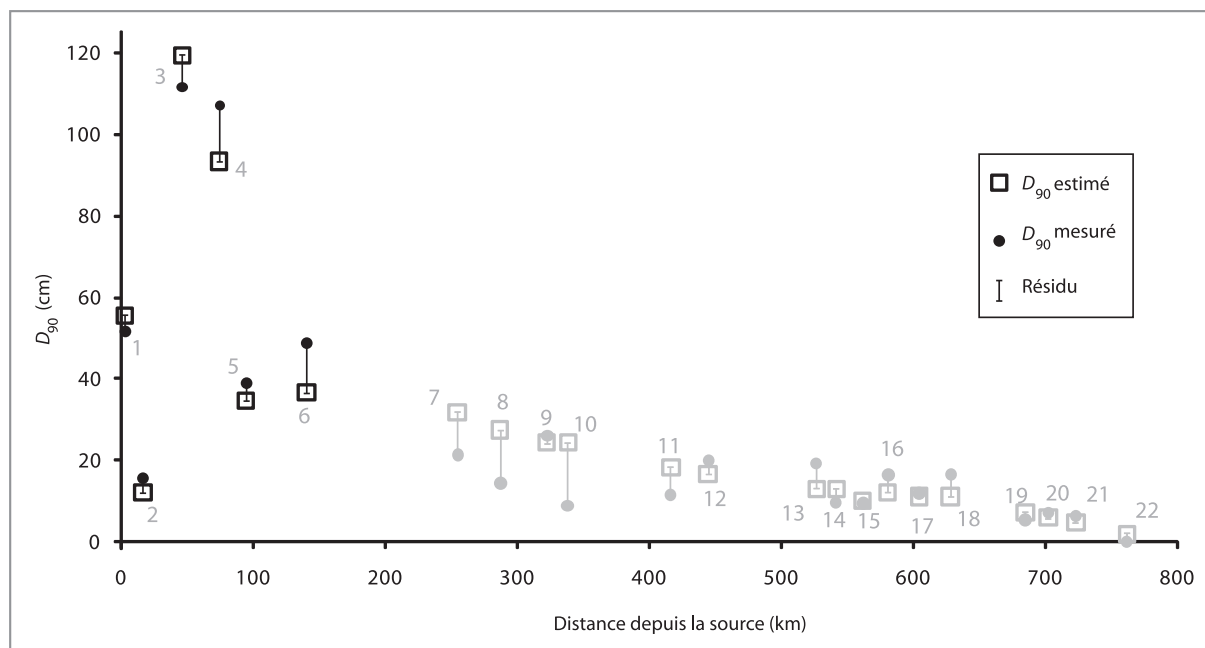


FIGURE 7 – Régression linéaire multiple et résidus.



nulométrique de la charge de fond du Rhône suisse n'a pas pour seule influence majeure la distance à la source ( $D_s$ ). On n'est donc pas en présence d'un simple phénomène de décroissance granulométrique amont-aval. La réalité est beaucoup plus complexe car de nombreux autres facteurs conditionnent aussi le gradient granulométrique, tels la pente hydraulique locale  $S$ , qui dépend essentiellement du profil en long de la vallée glaciaire et du remblaiement partiel de la plaine alluviale par de puissants cônes de déjection, et la puissance spécifique, qui dépend des apports liquides et solides des affluents. En cela, la combinaison de la régression exponentielle et de la régression linéaire multiple apparaît comme une approche prometteuse de la bonne compréhension des discontinuités de transfert sédimentaire dans le bassin rhodanien, une problématique centrale dans le projet de 3<sup>e</sup> correction du Rhône, dont les élargissements ne manqueront pas de modifier la granularité de la charge de fond. Il s'agit maintenant de multiplier et de varier les mesures granulométriques (par exemple avec  $D_{50}$ ), afin de mieux comprendre le fonctionnement du cours d'eau.

#### REMERCIEMENTS

Nos plus vifs remerciements sont adressés à la Fondation Ignace Mariétan pour sa contribution au financement de cette étude. Nous remercions également M. Alexandre Vogel, hydrogéologue dans le cadre du projet de 3<sup>e</sup> Correction du Rhône, Canton du Valais, pour la mise à disposition des données hydrauliques.

#### BIBLIOGRAPHIE

EL KADI, K. 2006. *Evolution d'un lit de rivière en fonction des apports*. Thèse de doctorat en Mécanique, Université Claude-Bernard (Lyon 1), 189 p.

FERGUSON, R.I. 2005. Estimating critical stream power for bedload transport calculation in gravel-bed rivers, *Geomorphology*, 56: 1-14.

FRINGS, R. 2007. *From gravel to sand: downstream fining of bed sediments in the lower river Rhine*. Utrecht: Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap, Faculteit Geowetenschappen, Universiteit Utrecht, 219 p.

HAMAR, O. & N. CLIFFORD 2007. Geomorphological explanation of the long profile of the Lower Mississippi River, *Geomorphology*, 84: 222-240.

KOMAR, P. D. 1987. Selective grain entrainment by a current from a bed of mixed sizes: a reanalysis, *Journal of Sedimentary Petrology*, 57(2): 203-211.

KUENEN, P.H. 1959. Experimental abrasion: 3. fluvial action on sand, *American Journal of Science*: 257, 172-190.

LEWIN, J. & P.A. BREWER 2002. Laboratory simulation of clast abrasion, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 145-164.

MONTANDON, F. 1931. L'étranglement du Rhône au Bois-Noir (Valais), *Les études rhodaniennes*, 7(3): 241-266.

MONTANÉ, A. 2009. *Approche morpho-sédimentaire et statistique du gradient granulométrique du Rhône*. Mémoire de master 2, Université Paris-Diderot (Paris 7), 96 p.

MOUSSAVI-HARAMI, R., A. MAHBOUBI & M. KHANEHBAD 2004. Analysis of controls on downstream fining along three gravel-bed rivers in the Band-e-Golestan drainage basin NE Iran, *Geomorphology*, 61: 143-153.

RECKING, A. 2006. *Etude expérimentale de l'influence du tri granulométrique sur le transport solide par charriage*. Thèse de doctorat en Mécanique des Fluides, INSA Lyon, 261 p.

REYNARD, E., G. ARNAUD-FASSETTA, L. LAIGRE & P. SCHOENEICH 2009. Le Rhône alpin vu sous l'angle de la géomorphologie: état des lieux, in: Reynard E., Evéquozy-Dayen M., Dubuis P. (éds.). Le Rhône: dynamique, histoire et sociétés, Sion, Archives de l'Etat du Valais, *Les Cahiers de Vallesia*, 21: 75-102 + 8 planches hors texte.

RICE, S. 1998. Which tributaries disrupt downstream fining along gravel-bed rivers?, *Geomorphology*, 22: 39-56.

SCHLUNEGGER, F., A. BADOUX, B.W. MCARDILL, C. GWERDER, D. SCHNYDRIG, D. RIEKE-ZAPP & P. MOLNAR 2009. Limits of sediment transfer in an alpine debris-flow catchment, Illgraben, Switzerland, *Quaternary Science Reviews*, 28: 1097-1105.

STERNBERG, H. 1875. Über Längen- und Querprofil geschiebeführender Flüsse, *Zeitschrift für Bauwesen*, 25: 483-506.

STOFFEL, M., M. BOLLSCHWEILER, A. LEUTWILER, P. AEBY 2008. Tree-ring reconstruction of debris-flow events leading to overbank sedimentation on the Illgraben cone (Valais Alps, Switzerland), *The Open Geology Journal*, 2: 18-29.

SURIAN, N. 2002. Downstream variation in grain size along an Alpine river, *Geomorphology*, 43: 137-149.

WANG, Z., Z. CHEN, M. LI, J. CHEN & Y. ZHAO 2009. Variations in downstream grain-sizes to interpret sediment transport in the middle-lower Yangtze River, China: A pre-study of Three-Gorges Dam, *Geomorphology*, 107: 217-229.

