

## LES INONDITES RHODANIENNES D'OCTOBRE 1993 ET JANVIER 1994 EN MILIEU FLUVIO-DELTAIQUE. L'EXEMPLE DU PETIT RHONE



Gilles ARNAUD-FASSETTA\*

### RESUME

Des prélèvements par carottage sur des transects perpendiculaires au cours du Petit Rhône (bras occidental du delta du Rhône) associés à une analyse granulométrique des dépôts ont été réalisés postérieurement à deux événements hydrologiques exceptionnels (octobre 1993 et janvier 1994). Une méthode de calcul tridimensionnelle, élaborée lors de cette étude, a permis d'estimer le volume de sédiments piégé dans le Petit Rhône au cours de ces deux crues.

Le volume total de sédiments accumulé sur les rives du fleuve s'élève en octobre 1993 à 430602 m<sup>3</sup> (0,65 Mt; 6,8 t / km<sup>2</sup> / 42 j) et à 914358 m<sup>3</sup> (1,37 Mt; 14,4 t / km<sup>2</sup> / 70 j) en janvier 1994, soit une variation de 1 à 2,1 en faveur des dépôts de janvier 1994. Les hypothèses retenues sont une variation de la charge relative de l'eau lors des deux crues et/ou un apport de fines supérieur en janvier 1994 en rapport avec des débordements plus étendus et/ou une durée plus importante de la crue et/ou une remobilisation préférentielle des fines stockées lors de la crue d'octobre 1993.

L'analyse granulométrique des dépôts révèle que les sables déposés en janvier 1994 sont plus grossiers que ceux mis en place en octobre 1993. Le stock sableux représente 206344 m<sup>3</sup> (0,33 Mt; 3,5 t / km<sup>2</sup> / 42 j) en octobre 1993 et 446298 m<sup>3</sup> (0,71 Mt; 7,5 t / km<sup>2</sup> / 70 j) en janvier 1994, soit respectivement 48 % et 49 % du stock sédimentaire global. Une corrélation positive entre charge solide et débit liquide est envisagée.

L'emploi de l'analyse statistique multivariée (A.C.P) a été appliquée à la recherche et à la hiérarchisation des facteurs du stockage sédimentaire. Les facteurs du piégeage sont par ordre d'importance: les conditions hydro-topographiques spécifiques à l'amont et à l'aval du fleuve, les ruptures de pente du profil en long, la largeur entre les digues, la position dans le méandre, la hauteur des berges, l'opposition rive concave-rive convexe et le taux de recouvrement de la ripisilve.

Mots-clés: Delta du Rhône, Environnements fluviaux, Sédimentologie, Quantification, Analyse factorielle.

### ABSTRACT

#### THE FLUVIAL DEPOSITS OF THE RHONE RIVER IN OCTOBER 1993 AND JANUARY 1994 ON THE FLUVIO-DELTAIC ENVIRONMENT. THE EXAMPLE OF THE «PETIT RHONE»

After the exceptional events (floods of october 1993 and january 1994), cores have been collected following perpendicular transects to the «Petit Rhône» river (western branche of the Rhône delta). Sedimentological analysis and three-dimensional calculation have been done to characterize and quantify the sediment trapped in the «Petit Rhône» during these two floods.

The global volume of sediment accumulated on the banks of the river is equal to 430,602 m<sup>3</sup> (0.65 Mt; 6.8 t / km<sup>2</sup> / 42 d) in october 1993 and 914,358 m<sup>3</sup> (1.37 Mt; 14.4 t / km<sup>2</sup> / 70 d) in january 1994, therefore a variation from 1 to 2.1 is observed in a favor of the flood of january 1994. This may be explained either by a variation of the solid river discharge during both floods and/or an important supply of finer sediment in january 1994 in relation to an important overflowing and/or a preferential removing of the finer sediments accumulated during the flood of october 1993.

The granulometric analysis of the deposits shows that the sand sediments accumulated in january 1994 are coarser than those accumulated in october 1993. The sand deposits are equal to 206,344 m<sup>3</sup> (0.33 Mt; 3.5 t / km<sup>2</sup> / 42 d) in october 1993 and 446,298 m<sup>3</sup> (0.71 Mt; 7.5 t / km<sup>2</sup> / 70 d) in january 1994, respectively 48 % and 49 % of the global volume of sediments. A positive correlation between solid and liquid river discharge is considered.

The multivariate statistical analysis have been used for the characterization and the hierarchization of the sediment trapping factors. The trapping factors are in order of importance: (i) the specific hydro-topographic conditions from the upstream to the downstream of the river, (ii) the breaking slope along the profile, (iii) the lenght between the dikes, (iv) the location in the meander, (v) the height of the banks, (vi) the opposition of the concave bank / convex bank and (vii) the cover rate of the river forest.

Key-words: Rhône delta, Fluvial environments, Sedimentology, Quantification, Factor analysis.

\* Institut de Géographie, Université de Provence, U.R.A. du C.N.R.S. 29, avenue Robert Schuman, 13621 AIX-EN-PROVENCE Cedex.

## INTRODUCTION

Le débordement des eaux fluviales par franchissement des levées de berge au moment des crues reste un processus commun aux plaines deltaïques (Chamley, 1988). La succession de ces événements hydrologiques et la répartition des stocks sédimentaires mobilisés participent à la construction de la plaine d'inondation (Zwolinski, 1992).

Des descriptions qualitatives ont permis de dresser les grands traits de la morphologie et la nature des sédiments rencontrés dans les plaines d'inondation (Schumm, 1977; Lewin, 1978; Reineck et Singh, 1980; Bravard, 1983). De nombreux travaux ont montré l'importance des épisodes de crue dans l'évolution des plaines fluvio-deltaïques (Moore, 1966; Morgan, 1970; Kesel *et al.*, 1974). Il semble désormais important de caractériser plus précisément les milieux de sédimentation fluviales, à travers l'étude quantitative et qualitative des stocks sédimentaires.

La mobilisation des stocks sédimentaires dans une plaine fluvio-deltaïque s'effectue essentiellement durant les périodes de crue du fleuve. Lors d'une crue, le fleuve transporte des alluvions depuis la tête du delta jusqu'à son embouchure, mais les sédiments atteignant la frange littorale et la plate-forme continentale ne représentent qu'une partie de ceux mobilisés dans l'ensemble du système deltaïque. Avant d'atteindre le littoral, une quantité non négligeable des sédiments en transit dans les lits fluviaux reste piégée dans certains milieux de sédimentation fluviales plus favorables au stockage. La production sédimentaire globale comprend donc le transit et le stockage des sédiments dans les lits fluviaux.

Si certaines études ont tenté de quantifier les stocks sédimentaires mobilisés lors des crues (Pizzuto, 1987; Mc Carthy *et al.*, 1991), cette question reste encore peu abordée sur le fleuve Rhône. Les résultats concernent essentiellement le transport sédimentaire en amont du delta. En aval de Lyon, la charge de fond représente environ 36000 t. an<sup>-1</sup> (Cottreau, 1988). Sur le tiers central du bas-Rhône, le transport par charriage atteint environ 144000 t. an<sup>-1</sup> après les aménagements par dérivation (Savey et Deléglise, 1967; Tormos *et al.*, 1989). Le tiers aval du Bas-Rhône a fait l'objet d'une étude quantitative montrant l'importance du charriage (32000 t. an<sup>-1</sup>) dans le transit sédimentaire entre Beaucaire et Arles (Dugas, 1989). A proximité immédiate du delta du Rhône, les travaux actuels concernent essentiellement la quantification des matières en suspension (M.E.S). Les résultats font état d'une masse moyenne de M.E.S égale à 8 Mt. an<sup>-1</sup> transitant à Arles (Roditis et Pont, 1993).

Cet article est consacré à l'évaluation des volumes et de la granularité des sédiments déposés par le Petit Rhône (bras occidental du delta du Rhône) lors de deux événements hydrologiques remarquables et à l'analyse des causes de la distribution des sédiments. L'analyse quantitative et qualitative des sédiments accumulés sur la plaine deltaïque rhodanienne au cours des deux crues 1993-1994 associée aux facteurs du stockage sédimentaire doit permettre d'enrichir notre connaissance du fonctionnement des milieux de sédimentation fluviales.

L'objectif de cette étude est triple :

1 - quantifier le volume sédimentaire piégé sur les rives du Petit Rhône lors de deux événements hydrologiques exceptionnels.

2 - caractériser d'un point de vue granulométrique le matériel sableux mobilisé.

3 - analyser les facteurs explicatifs du stockage sédimentaire.

Cette étude fait suite aux inondations catastrophiques

de Camargue qui ont défrayé la chronique au cours des mois d'octobre 1993 et janvier 1994. Deux crues d'ampleur exceptionnelle ont en effet affecté, à quelques mois d'intervalle seulement, le sud-est de la France, et plus particulièrement le delta du Rhône. La crue du 22 septembre au 31 octobre 1993 a fait suite à de nombreux orages localisés, notamment dans la région vaclusienne et le pays aixois. Le débit maximal, atteint le 10 octobre, est de 994 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> à Fourques sur le Petit Rhône, pour un débit maximal de 9450 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> à Beaucaire. Beaucoup plus longue, la crue survenue le 11 décembre 1993 prend fin le 18 février 1994. Le débit maximal, atteint le 8 janvier, est de 1056 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> à Fourques, pour un débit maximal de 10568 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> à Beaucaire (fig. 1 et 2).

Situé dans la zone 3 (stockage) de l'hydrosystème fluvial rhodanien (95500 km<sup>2</sup>), le Petit Rhône est considéré comme un cours d'eau de rang 9 (Schumm, 1977). Bras secondaire du delta, celui-ci évacue aujourd'hui environ 10% des eaux du Rhône. Quelques tronçons du fleuve sont en voie de colmatage. Le volume annuel d'alluvions qu'il apporte à la côte n'est pas suffisant pour compenser les effets de l'érosion marine de part et d'autre de l'embouchure du fleuve (CAMARGUE, Collectif, 1970). La délimitation actuelle de l'espace fluvial du Petit Rhône est largement conditionnée par l'endiguement quasi continu du fleuve jusqu'à la mer. Ces digues agissent directement sur l'étendue de la plaine d'inondation qu'elles tendent à réduire et, de façon indirecte, sur les débits liquides et la vitesse du courant.

## I-QUANTIFICATION DU STOCKAGE ALLUVIONNAIRE

### 1 - APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Les débordements «spectaculaires» du Petit Rhône durant l'année 1993-1994 ont conduit, à plusieurs reprises, aux inondations de grande ampleur sur le delta. Le tracé du Petit Rhône, long de 70 km, décrit de nombreux méandres, tendant à favoriser une accumulation de matériel sédimentaire sur les rives du cours d'eau. L'accumulation sédimentaire reste cependant très inégale, celle-ci s'effectuant surtout sur les berges de rive convexe.

Six transects implantés dans les méandres perpendiculairement à l'axe d'écoulement ont été répartis régulièrement de l'amont à l'aval du cours du Petit Rhône, après qu'une étude de reconnaissance menée *in situ* ait confirmé que six transects étaient suffisants pour analyser l'ensemble du tronçon (fig. 1 et 3).

Des prélèvements par carottage (40 carottes au total) ont été effectués dans chacun des milieux de sédimentation rencontrés qui sont les bancs médians, les chenaux émergés à l'étiage, les bancs latéraux, les berges sous-aquatiques, les levées de berge, la plaine d'inondation proximale et la plaine d'inondation distale (fig. 3). Les chenaux émergés à l'étiage, appelés également «chutes», sont liés au recouplement par tangence des bancs latéraux lors des crues du fleuve (Reineck et Singh, 1980; Bravard et Gilvear, 1993). Ils peuvent alors donner naissance à des bancs médians.

La hiérarchisation des corps sédimentaires étudiés s'est appuyée sur les travaux de Macaire (1990). Une séquence élémentaire de crue se compose d'une ou plusieurs couches. Chacune d'entre-elles a été échantillonnée. La base de chaque séquence a été identifiée en laboratoire par recouplement de plusieurs méthodes: la discrimination *de visu* (couleur, texture apparente, couche de matière organi-

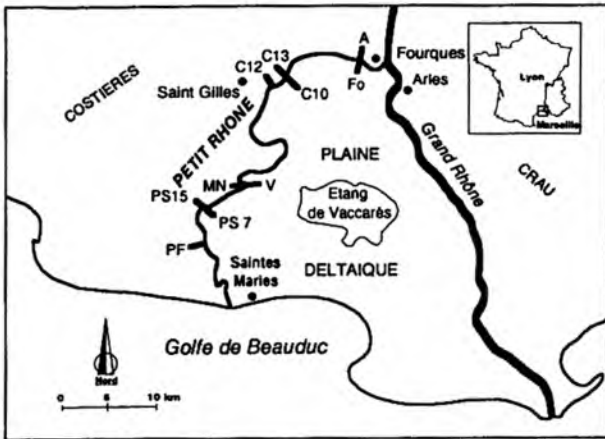


Fig. 1: Carte de localisation indiquant l'implantation des transects sur le Petit Rhône.

Fig. 1: Location map showing the Petit Rhône transects.

que déposée entre deux crues, bioturbation...), la gammadensimétrie (analyse des discontinuités des corps sédimentaires) et la radiographie (analyse des structures sédimentaires). L'analyse granulométrique a permis en outre de déterminer la part respective des sables, limons et argiles pour chaque échantillon.

## 2 - EVALUATION DES VOLUMES SÉDIMENTAIRES

### 2-1 - Volume global de sédiments déposés sur les rives du fleuve

Sur chaque *demi-transect*, correspondant à une rive du cours d'eau, l'épaisseur de chaque séquence de crue a été mesurée dans les milieux de sédimentation. L'épaisseur moyenne d'un dépôt a été obtenue en appliquant la formule de la *moyenne arithmétique pondérée*. Il s'agit d'affecter à l'épaisseur moyenne de la séquence de crue dans un milieu de sédimentation un coefficient d'occupation prenant en compte la portion d'espace occupée par le milieu de sédimentation sur le demi-transect.

L'épaisseur moyenne des dépôts varie de 2 centimètres (sites de plaine d'inondation en rive concave) à 35 centimètres pour les plus épais (sites en rive convexe et proches du chenal actif). L'épaisseur des dépôts montre un gradient transversal, à savoir une décroissance de l'épaisseur lorsque l'on s'éloigne du chenal. A titre comparatif, les travaux de Kesel *et al.* (1974) ont montré que l'épais-

seur des dépôts abandonnés par le Mississippi en Louisiane lors de la crue de 1973 a atteint 53 cm sur les levées de berge et 1,1 cm dans la plaine d'inondation. L'épaisseur des dépôts est maximale le long des rives convexes du Petit Rhône. Les vitesses de courant de moindre intensité du côté de la convexité des méandres entraînent le dépôt de la charge de fond (Russel, 1967; Barthurst, 1979; Bravard et Gilvear, 1993). Un gradient amont-aval est également mis en évidence. Les épaisseurs les plus importantes concernent les dépôts mis en place dans la partie amont de l'espace fluvial du Petit Rhône (fig. 4). Les dépôts de la crue de janvier 1994 sont systématiquement plus épais. Deux hypothèses peuvent alors être envisagées. La crue de janvier 1994 a déposé du matériel alluvial en plus grande quantité et/ou un remaniement a affecté la séquence de crue d'octobre 1993. Celui-ci atténuerait alors les épaisseurs initiales des dépôts.

Nous avons défini l'extension longitudinale et latérale des sites d'étude à partir de la carte topographique I.G.N au 1/25000. L'observation *in situ* des dépôts a montré que les digues délimitaient généralement l'extension latérale du stockage sédimentaire. L'extension longitudinale des sites d'étude est fonction de l'homogénéité du milieu fluvial. Nous avons calculé leurs surfaces respectives ( $I$ ) exprimées en  $m^2$ . Pour chaque site, nous avons calculé le volume de sédiments déposés ( $V$ ) en multipliant  $I$  par  $E$ ,  $E$  correspondant à l'épaisseur moyenne de la séquence de crue en un site donné (tab. 1 et fig. 5).

La surface endiguée de l'espace fluvial du Petit Rhône a été totalement submergée lors des crues d'octobre 1993 et janvier 1994. Nous appelons  $S_j$  la *surface totale de l'espace fluvial submergé* du Petit Rhône lors de ces crues.  $S_j$  correspond en fait à l'ensemble du lit endigué du Petit Rhône et sa valeur est de  $10271932 m^2$ . De même, nous appelons *surface de référence* ( $S_r$ ) la somme des surfaces inondées de chaque site d'étude.  $S_r$  représente une surface de  $485246 m^2$ .

Le calcul du volume sédimentaire global tient compte du rapport entre  $S_r$  et  $S_j$ . Toutes les estimations proposées s'accompagnent d'une marge d'erreur de  $\pm 10\%$ . Le volume de sédiments déposé par le Petit Rhône sur  $S_r$  est de  $20342 m^3$  en octobre 1993 et de  $43194 m^3$  en janvier 1994. En appliquant la *loi de la proportionnalité* entre  $S_r$  et  $S_j$ , le volume total de sédiments déposé sur  $S_j$  équivaut à  $430602 m^3$  (soit un tonnage total de 0,65 Mt et un taux de dégradation spécifique (T.D.S) de  $6,8 t / km^2 / 42j$ ) en 1993 (du 22 sept. au 31 oct.) et à  $914358 m^3$  (soit un tonnage total de 1,37 Mt et un T.D.S de  $14,4 t / km^2 / 70j$ ) en 1994 (du 11 déc. au 18 fév.).

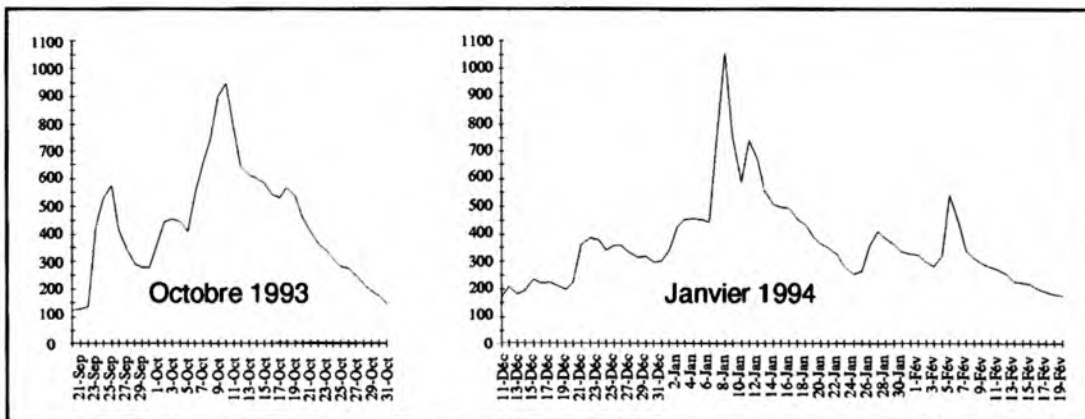


Fig. 2: Evolution des débits liquides journaliers (en  $m^3.s^{-1}$ ) des deux épisodes de crue à Fourques (données C.N.R.).

Fig. 2: River liquid discharge ( $m^3.s^{-1}$ ) of the both floods at Fourques.

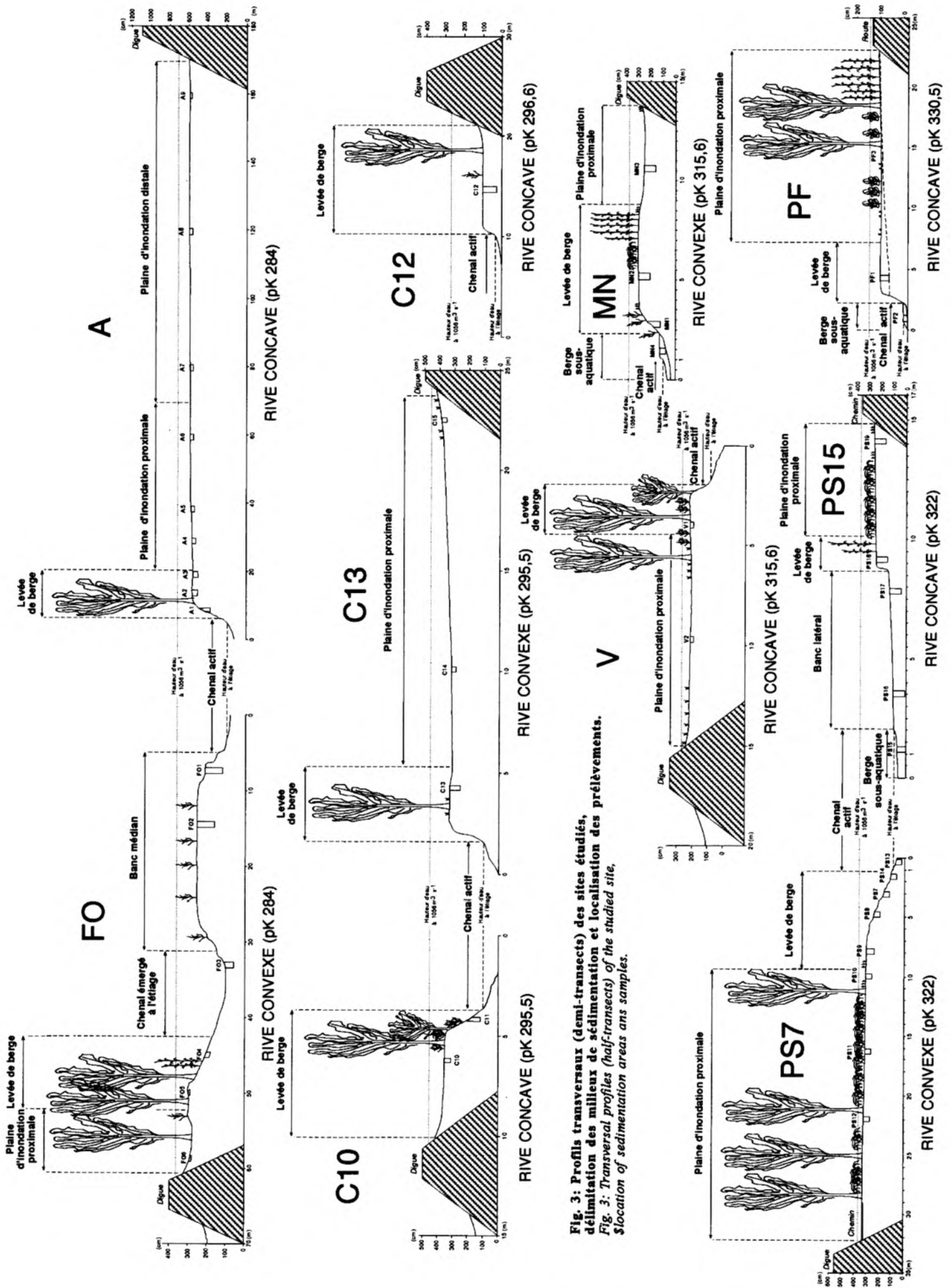


Fig. 3: Profils transversaux (demi-transsects) des sites étudiés, délimitation des milieux de sédimentation et localisation des prélèvements.  
 Fig. 3: Transversal profiles (half-transsects) of the studied site, location of sedimentation areas and samples.

Sites d'étude	I en m <sup>2</sup>	E (o.93) en m	E (j.94) en m	V (o.93) en m <sup>3</sup>	V (j.94) en m <sup>3</sup>
A	296485	0,033	0,076	9784	22533
FO	24768	0,128	0,203	3170	5028
C	10202	0,100	0,230	1020	2346
C	47659	0,013	0,032	620	1525
C	7254	0,230	0,350	1668	2539
MN	11301	0,075	0,170	848	1921
V	11337	0,000	0,038	0	431
PS	16469	0,041	0,071	675	1169
PS	15988	0,075	0,091	1199	1455
PF	43784	0,031	0,097	1357	4247
Somme (Sr)	485246			20342	43194

Tab. 1: Surface (I), épaisseur de sédiments (E) et volume de sédiments (V) par site d'étude.  
Tab. 1: Surface (I), thickness of sediments (E) and volume of sediments (V) by studied area.

L'analyse comparée de ces résultats met en évidence de larges différences de stockage sédimentaire d'une crue à l'autre, celui-ci variant dans un rapport de 1 à 2,1. Le volume le plus important concerne les dépôts de janvier 1994. Ce résultat peut s'expliquer par des débits liquides ou solides plus abondants lors de cet épisode de crue et/ou par la durée accrue de l'événement hydrologique exceptionnel et/ou par le remaniement partiel de la séquence sédimentaire d'octobre 1993 lors de la crue suivante.

## 2-2 - Volume de sédiments par milieu de sédimentation

Chaque milieu de sédimentation occupe une portion d'espace plus ou moins conséquente. L'application d'un coefficient d'occupation a permis d'affecter aux milieux de sédimentation une pondération prenant en compte l'espace respectif qu'ils occupent dans l'espace fluvial total. La part de chaque milieu de sédimentation est calculée en totalisant leur largeur spécifique par demi-transect. Le coefficient d'occupation est ensuite déduit de la moyenne des largeurs spécifiques par milieu de sédimentation (fig. 6).

Le volume de sédiments déposé dans chaque milieu de sédimentation respectif est obtenu en multipliant le volume total de sédiments déposé par le Petit Rhône par le coefficient d'occupation de chaque milieu de sédimentation.

L'essentiel des dépôts correspond aux levées de berge (1993: 163629 m<sup>3</sup>; 2,6 t/km<sup>2</sup>/42 j; 1994: 347456 m<sup>3</sup>; 5,5 t/

km<sup>2</sup>/70 j) et à la plaine d'inondation (1993: 176547 m<sup>3</sup>; 2,8 t/km<sup>2</sup>/42 j; 1994: 374887 m<sup>3</sup>; 5,9 t/km<sup>2</sup>/70 j). Les autres milieux de sédimentation, soit proches de la bande active du chenal (banc médian, berge sous aquatique, chenal émergé à l'étiage), soit éloignés (plaine d'inondation distale), ne représentent pas un volume important. Cette distribution sédimentaire s'accorde avec les travaux de nombreux auteurs qui décrivent dans les zones deltaïques un stockage sédimentaire préférentiel le long des levées de berge et dans la plaine d'inondation (Kesel *et al.*, 1974; Allen, 1989). Le volume de sédiments en janvier 1994 est toujours supérieur à celui d'octobre 1993 et ce quel que soit le milieu de sédimentation (fig. 7).

L'analyse granulométrique a permis de calculer, pour chaque site d'étude, le pourcentage de sables respectif à chaque milieu de sédimentation (fig. 8).

Les bancs médians ainsi que les chenaux émergés à l'étiage représentent des milieux alluvionnaires très riches en sables. Les levées de berge sont constituées de sédiments moins sableux. A l'écart des dynamiques du chenal, les dépôts de la plaine d'inondation sont minoritairement composés de sables, leur teneur en sables décroissant au fur et à mesure de l'éloignement progressif du chenal. Notons que, quel que soit le milieu de sédimentation, la teneur en sables est toujours supérieure en 1994, exceptée dans la plaine d'inondation proximale où l'apport en fines s'accroît en 1994.

Le rapport entre la crue d'octobre 1993 (206344 m<sup>3</sup> de

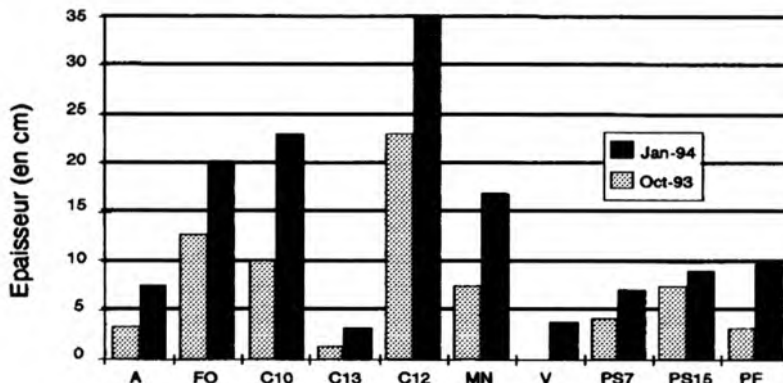


Fig. 4: Epaisseur moyenne des séquences de crue par demi-transect.  
Fig. 4: Mean thickness of flood sequences by half-transect.

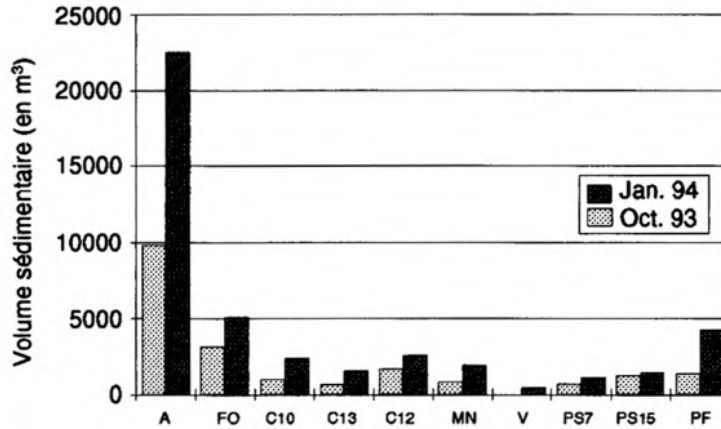


Fig. 5: Volume de sédiments déposés sur chaque site d'étude.  
Fig. 5: Volume of sediments accumulated on every site.

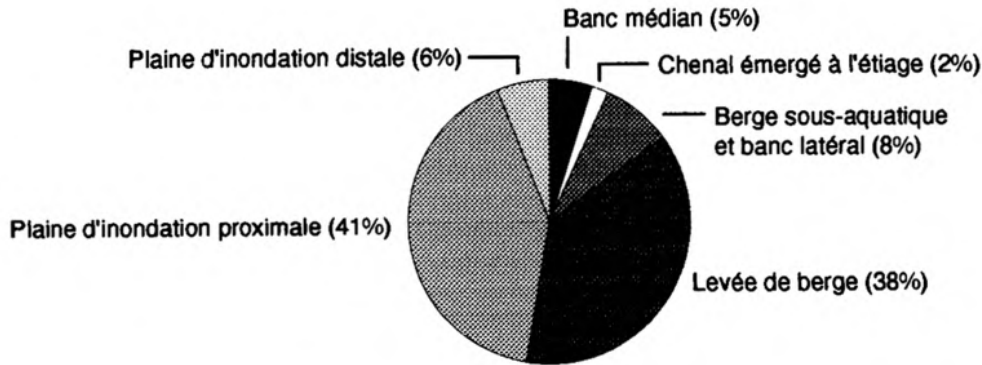


Fig. 6: Coefficient d'occupation par milieu de sédimentation (surfaces en %).  
Fig. 6: Occupation coefficient by sedimentation area (surface in %).

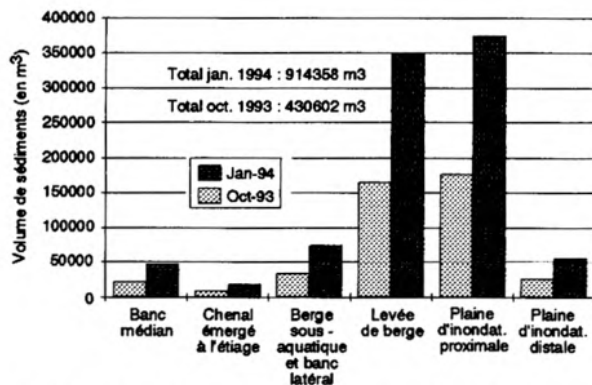


Fig. 7: Volume de sédiments par milieu de sédimentation.  
Fig. 7: Volume of sediments by sedimentation area.

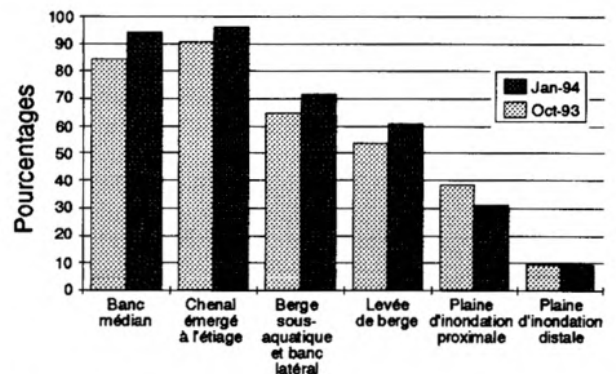


Fig. 8: Pourcentage de sables par milieu de sédimentation.  
Fig. 8: Percentage of sands by sedimentation area.

sables, T.D.S de 3,5 t / km<sup>2</sup> / 42 j) et la crue de janvier 1994 (446298 m<sup>3</sup> de sables, T.D.S de 7,5 t / km<sup>2</sup> / 70 j) est de 1 à 2,2 en faveur de cette dernière. Les levées de berge en stockent l'essentiel (1993: 88360 m<sup>3</sup> de sables, T.D.S de 1,5 t / km<sup>2</sup> / 42 j; 1994: 211948 m<sup>3</sup> de sables, T.D.S de 3,6 t / km<sup>2</sup> / 70 j). Au cours des épisodes de crue suivants, les possibilités de remaniement de ce matériel sableux seront importantes, surtout pour les parties situées sur la face interne des levées de berge (fig. 9).

Les autres milieux de sédimentation proches de la bande active du chenal (banc médian, berge sous aquatique, chenal émergé à l'étiage) ne représentent pas un volume important car, malgré la richesse en sables des sédiments qui les composent, ces milieux de sédimentation n'occupent qu'une portion d'espace assez réduite (coefficient d'occupation = 12 %) le long du cours du Petit Rhône. Stocké dans des milieux de sédimentation réputés «instables», ce matériel sableux apparaît le plus sensible aux remaniements (transfert sédimentaire) lors des crues efficaces ultérieu-

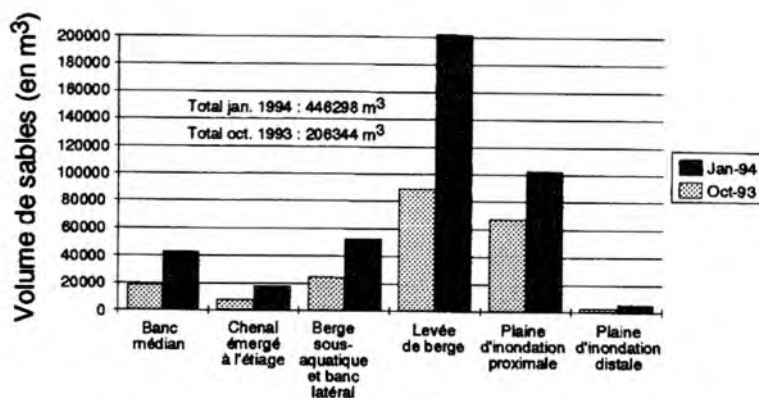


Fig. 9: Volume de sables par milieu de sédimentation.  
Fig. 9: Volume of sands by sedimentation area.

res.

Le volume sableux déposé dans la plaine d'inondation proximale est également important (1993: 67088 m<sup>3</sup>, T.D.S de 1,1 t / km<sup>2</sup> / 42 j; 1994: 116215 m<sup>3</sup>, T.D.S de 2 t / km<sup>2</sup> / 70 j). Il est logiquement plus faible lorsque l'on entre dans la partie distale de la plaine d'inondation (1993: 2325 m<sup>3</sup>, T.D.S de 0,04 t / km<sup>2</sup> / 42 j; 1994: 4938 m<sup>3</sup>, T.D.S de 0,08 t / km<sup>2</sup> / 70 j), compte tenu de l'amenuisement de l'hydrodynamisme. Les sables accumulés dans cette partie de l'espace fluvial, dont la caractéristique première est la «capitalisation sédimentaire», constitue un stockage sédimentaire potentiel peu remobilisable à court terme.

En conclusion, la crue de janvier 1994 a été «plus débordante», donc plus énergétique que celle d'octobre 1993. Elle devrait avoir apporté plus de sables sur les rives du fleuve, à charges supposées égales.

Le volume sableux déposé sur les rives du Petit Rhône en janvier 1994 a été supérieur à celui d'octobre 1993. Les sables ont représenté à chaque crue environ 50 % du volume sédimentaire global. Dans le détail, l'apport en fines s'est accrue en 1994 dans la plaine d'inondation proximale (fig. 9). Quels sont les facteurs susceptibles d'expliquer ce phénomène? En premier lieu, la charge relative de l'eau n'a peut être pas été identique lors des deux crues. De plus, la crue de janvier 1994, «plus débordante» d'environ 50 cm, a pu apporter des M.E.S en plus grande quantité. Enfin, une remobilisation préférentielle des fines déposées au sommet des séquences d'octobre 1993 est également envisageable.

## II - CARACTERISATION GRANULOMETRIQUE DES INONDITES

Nous avons associé les paramètres *CM* développés par Passega (1957), Bravard (1983), Peiry (1988) et l'analyse statistique de la phase sableuse. L'image granulométrique *CM* obtenue à partir des échantillons recueillis dans l'espace fluvial (sub)émergé du Petit Rhône est globalement complète. Les cinq segments distingués fournissent une discrimination pertinente des milieux rivulaires et des types de dynamiques hydrosédimentaires associées (fig. 10 A). Elle permet également de comparer les dépôts du delta du Rhône avec ceux du Haut-Rhône et du Bas-Rhône (fig. 10 B).

### 1 - LES BANCS MÉDIANS

Les bancs médians sont composés d'alluvions mises en place par des dynamiques hydrosédimentaires soutenues,

91 % des échantillons étudiés (22 au total) se répartissant sur le segment PQ de l'image *CM*.

La fraction sableuse représente respectivement 84 % et 94 % des sédiments en 1993 et 1994. L'histogramme des fréquences modales montre la prédominance du mode sableux à 160-125 microns (fig. 11 A). Cependant, le reste de la distribution modale diverge entre les deux événements hydrologiques. Les dépôts mis en place en 1993 sont plus fins (fréquence du mode à 100-80 microns égale à 44 % en 1993 contre 15 % en 1994). Corrélativement, ceux mis en place en 1994 ont des modes mieux représentés dans les fractions grossières (fréquence du mode à 250-200 microns égale à 23 % en 1994 contre 14 % en 1993, fréquence du mode à 315 microns égale à 15 % en 1994, non représentée en 1993). Les sables des bancs médians déposés en 1994 ont une granularité plus grossière que ceux mis en place en 1993.

### 2 - LES CHENAUX ÉMERGÉS À L'ÉTIAGE

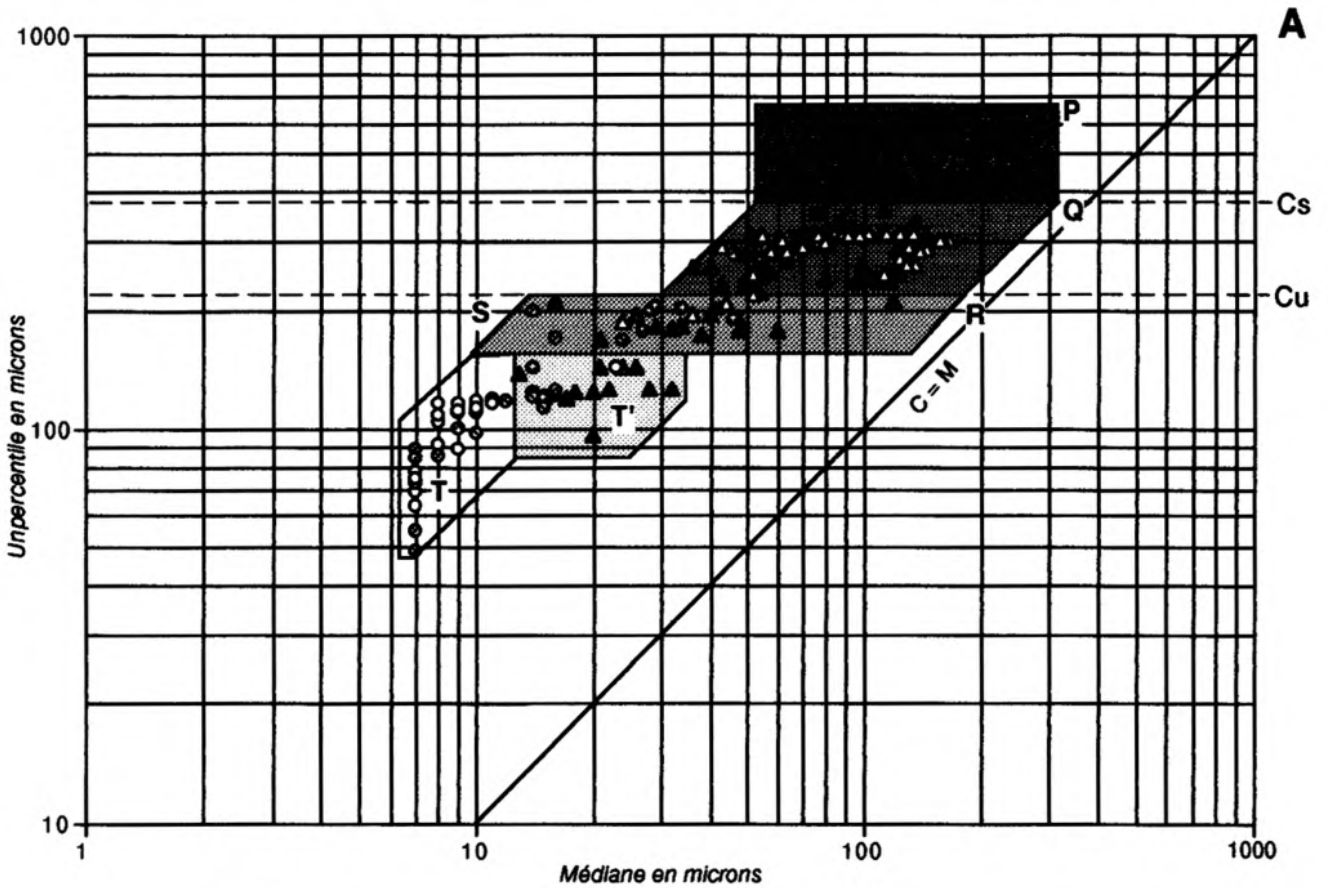
Les dépôts qui constituent les chenaux émergés à l'étiage (10 échantillons étudiés) sont majoritairement issus de dynamiques soutenues (suspension graduée associée au roulement).

Le matériel sableux représente respectivement 90 % et 96 % des sédiments piégés dans les chenaux émergés à l'étiage en 1993 et 1994. Il est caractérisé par des valeurs modales qui témoignent de la présence de deux stocks sableux distincts (fig. 11 B). Un premier stock, le plus fréquent, est constitué d'une fraction sableuse moyenne, marquée par des valeurs modales fortes, à 250-200 microns. Un deuxième stock, moins bien représenté, est constitué de sables fins dont les valeurs modales atteignent 100-80 microns. L'existence de ces deux stocks sableux est imputable à des dynamiques de transport différenciées.

### 3 - LES BANCS LATÉRAUX ET LES BERGES SOUS-AQUATIQUES

Les bancs latéraux et les berges sous-aquatiques (48 échantillons étudiés) sont constitués de sédiments plus fins qui appartiennent pour 92 % d'entre-eux au segment QR. Ils ont été mis en place par suspension graduée, souvent lors de la décrue du fleuve.

Les sables accumulés dans ce milieu alluvionnaire représentent respectivement 66 % et 72 % des sédiments en 1993 et 1994. Ils présentent une répartition modale limitée aux sables fins (modes inférieurs à 200 microns). En 1993, le mode le plus représentatif est 100-80 microns. Celui de



- Milieux de sédimentation -

- Banc médian (n = 22)
  - ◆ Chenal émergé à l'étiage (n = 10)
  - △ Berge sous-aquatique et banc latéral (n = 48)
  - ▲ Bas de berge (n = 44)
  - ▲ Haut de berge (n = 61)
  - Plaine d'inondation proximale (n = 41)
  - Plaine d'inondation distale (n = 20)
- (n = nombre d'échantillons étudiés)

- Milieux de sédimentation associés aux modes de transport -

- P-Q = Suspension graduée avec quelques éléments roulés
  - chenal émergé à l'étiage (100 %)
  - banc médian (91 %)
- Q-R = Suspension graduée
  - berge sous-aquatique et banc latéral (92 %)
  - bas de berge (82 %)
  - haut de berge (70 %)
  - plaine d'inondation proximale (37 %)
  - banc médian (9 %)
- R-S = Suspension uniforme
  - plaine d'inondation proximale (22 %)
  - haut de berge (15 %)
  - bas de berge (9 %)
  - berge sous-aquatique et banc latéral (8 %)
- T' = Suspension de type "pélagique" avec quelques particules issues de la suspension uniforme
  - plaine d'inondation proximale (17 %)
  - haut de berge (15 %)
  - bas de berge (9 %)
  - plaine d'inondation distale (5 %)
- T = Suspension de type "pélagique"
  - plaine d'inondation distale (95 %)
  - plaine d'inondation proximale (24 %)

**B**

Cours d'eau	Cu	Cs	Source bibliographique
Haut Rhône	180	280	Bravard (1983)
Bas Rhône	270	500	Roditis & Pont (1993)
Delta du Rhône	210	380	Cette étude
Saône à Lyon	200	?	Bravard & al. (1986)
Arve	220	350	Peiry (1988)
Mississippi (Mayersville)	250	600	Passéga (1957)

Fig. 10: A. Image granulométrique CM des milieux de sédimentation associés aux modes de transport construite à partir des dépôts de crue d'octobre 1993 et janvier 1994 du Petit Rhône. B. Paramètres Cu et Cs de quelques cours d'eau actuels.

Fig. 10: A. CM pattern of sedimentation areas and modes of sedimentation areas and modes of sediment transport following the floods of October 1993 and January 1994. B. Cu and Cs parameters of some actual rivers.



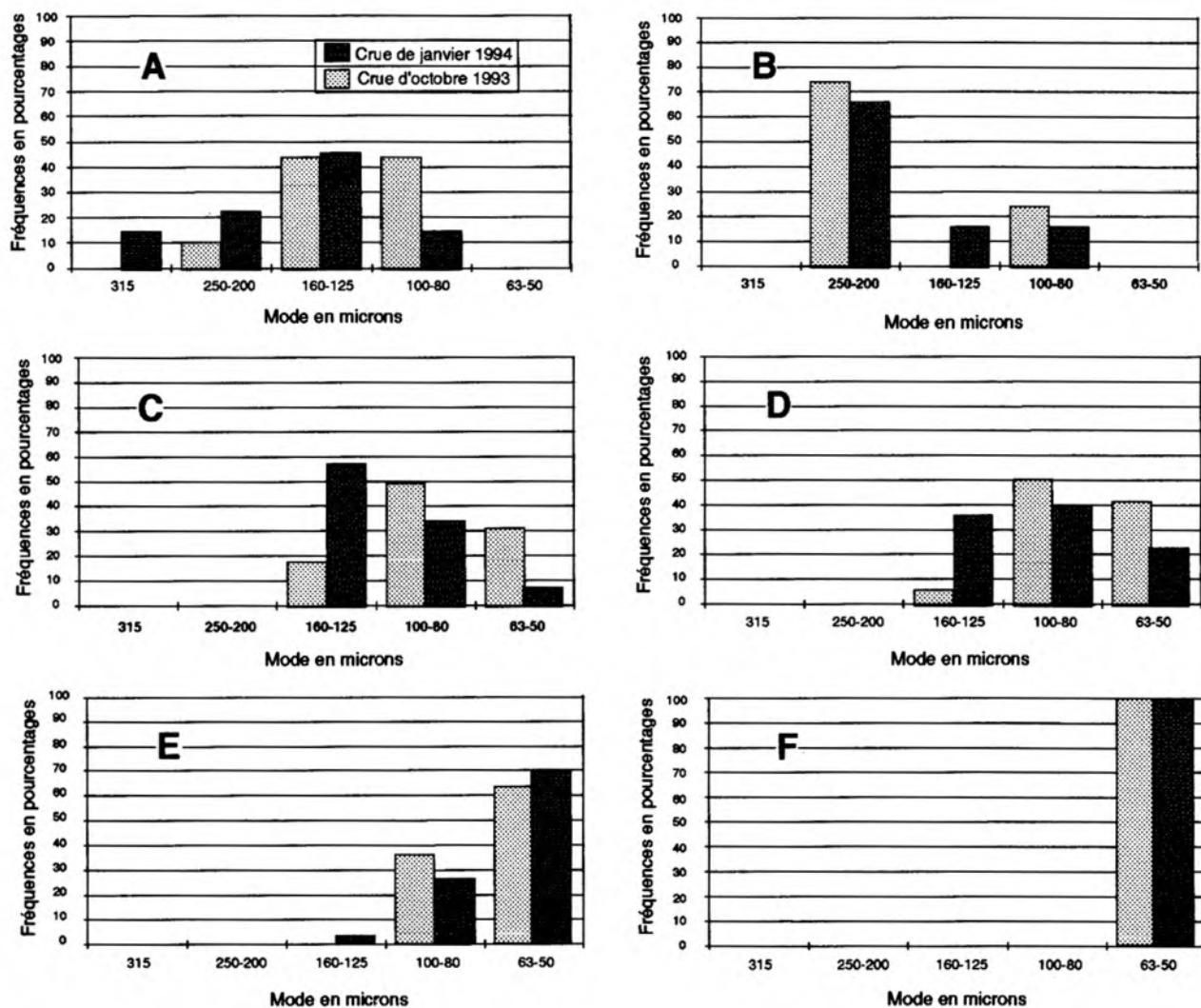
1994 est 160-125 microns (fig. 11 C). La répartition des fréquences modales met en évidence un renforcement granulométrique des dépôts mis en place en janvier 1994.

#### 4-LESLEVÉES DE BERGE

Les levées de berge (105 échantillons étudiés) se composent de sédiments fins. La plupart d'entre eux (entre 70 et 92 %) ont été mis en place par suspension graduée. Cependant, certains sédiments peuvent être issus de dynamiques plus atténuées (suspension uniforme). Les hauts de berge, à la pente plus douce et à l'écart du chenal, sont souvent composés d'alluvions issues de la suspension de type « pélagique » avec quelques particules apparte-

nant à la suspension uniforme.

La fraction sableuse représente respectivement 54 % et 61 % des sédiments en 1993 et 1994. L'histogramme des fréquences modales montre que les trois modes prédominants sont inférieurs à 200 microns. L'ensemble des dépôts de levées de berge est constitué majoritairement de sables fins. Les modes à 100-80 microns sont les plus fréquents (fig. 11 D). Dans le détail, le matériel sableux mis en place lors de la crue de janvier 1994 est plus grossier que celui déposé en octobre 1993. 37% des modes ont des valeurs de 160-125 microns en 1994, contre seulement 7 % en 1993. La répartition des modes sur l'histogramme met en évidence un renforcement granulométrique de la phase sableuse déposée en 1994.



#### G

Milieux de sédimentation	% de sable	1993			1994		
		% de limon	% d'argile	% de sable	% de limon	% d'argile	
Banc médian	84	15	1	94	6	0	
Chenal émergé à l'étiage	90	9	1	96	4	0	
Berge sous-aquatique et banc latéral	66	30	4	72	25	3	
Levée de berge	54	41	5	61	35	4	
Plaine d'inondation proximale	38	54	8	31	59	10	
Plaine d'inondation distale	9	78	13	9	76	15	

Fig. 11: Fréquences modales de la phase sableuse. A. Banc médian; B. Chenal émergé à l'étiage; C. Berge sous-aquatique et banc latéral; D. Levée de berge; E. Plaine d'inondation proximale; F. Plaine d'inondation distale. G. Tableau récapitulatif des textures par milieu de sédimentation.

Fig. 11: Modal frequencies of the sand fraction. A. Channel bar; B. Chute bar; C. Lower point bar and transverse bar; D. Natural levee; E. Proximal flood basin; F. Distal flood basin; G. Recapitulative table of the texture by sedimentation area.

## 5 - LA PLAINE D'INONDATION PROXIMALE

Les dépôts de la plaine d'inondation proximale (41 échantillons étudiés) sont composés de particules fines. Ils se répartissent sur quatre segments de l'image CM. Les plus nombreux sont regroupés sur les segments QR (37 %) et T (24 %). D'autres appartiennent aux segments RS (22 %) et T' (17 %). Les dynamiques de transport à l'origine de ces dépôts ne sont pas spécifiques au milieu de sédimentation. Espace fluvial de transition entre les levées de berge et les parties basses du bourrelet alluvial, ce milieu de sédimentation est marqué par la superposition de deux dynamiques fluviales, enregistrant à la fois les fortes turbulences des eaux du chenal lors des crues ainsi que les phases plus calmes de décantation des eaux turbides. L'image granulométrique de ces sédiments peut parfois être confondue avec celle des dépôts de levées de berge (Reineck et Singh, 1980).

Les sables ne sont plus prédominants puisqu'ils représentent 38 % de la texture en 1993 et seulement 31 % en 1994. Ce milieu rivulaire se caractérise par une fraction sableuse fine. Les modes sableux les plus fréquemment rencontrés se regroupent autour des valeurs 63-50 microns (64 % en 1993, 70 % en 1994), plus rarement autour de 100-80 microns (fig. 11 E). Dans le détail, la présence d'un mode à 160-125 microns, certes faiblement représenté en 1994 mais absent des dépôts de 1993, peut indiquer un léger renforcement de la taille maximale des sables mis en place en 1994 dans la plaine d'inondation proximale et attribuable à la compétence plus élevée de la crue de janvier 1994. Le renforcement granulométrique dans les sables grossiers semble s'effectuer au détriment des fractions 100-80 microns pour lesquelles nous observons une moins bonne représentation en 1994.

La proportion de fines atteint 62 % en 1993 (54 % de limons et 8 % d'argiles). En 1994, la plaine d'inondation proximale est marquée par un accroissement des fractions limoneuse (59 %) et argileuse (10 %) (fig. 11 G).

## 6 - LA PLAINE D'INONDATION DISTALE

Les alluvions se déposant dans ce milieu de sédimentation (20 échantillons étudiés) ont été mises en place dans 95 % des cas par suspension de type « pélagique » (segment T). Elles correspondent à des particules très fines déposées lors de la décantation des eaux de débordement du fleuve.

Les sédiments se composent majoritairement de limons (78 %) et d'argiles (13 %) en 1993. On note en 1994 un enrichissement en argiles (15 %) assorti d'une diminution de la fraction limoneuse (76 %) (fig. 11 G). La fraction sableuse ne constitue plus qu'une fraction minimale (9 %) des sédiments. Elle est marquée par la présence de grains fins dont le mode ne dépasse pas 63-50 microns (fig. 11 F).

En conclusion, l'analyse comparée de la phase sableuse a montré, à travers l'étude des fréquences modales, une distribution granulométrique très contrastée d'une crue à l'autre. Les sables des dépôts de janvier 1994 sont plus grossiers que ceux d'octobre 1993, et ce quel que soit le milieu de sédimentation, sauf dans la partie distale de la plaine d'inondation où les variations de l'hydrodynamisme n'ont plus d'influence directe sur la granularité des dépôts dont la mise en place s'effectue par des courants non tractifs.

Les raisons pour expliquer l'accroissement de la granularité des dépôts en 1994 ne sont pas simples. Les travaux de Manickam et Barbaroux (1987) sur le fleuve Loire

ont montré l'existence d'une corrélation positive entre la valeur des médianes et l'augmentation des débits liquides, la relation débit liquide-granularité s'estompant au delà d'une valeur critique de  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . On sait par ailleurs que les débits enregistrés sur le Petit Rhône ont différé entre la crue d'octobre 1993 (max.  $994 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) et celle de janvier 1994 (max.  $1056 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). L'augmentation des débits liquides en janvier 1994 a pu inférer un accroissement de la vitesse de l'eau, entraînant alors une augmentation sensible de la granularité des sables déposés sur les rives du fleuve. Précisons toutefois que les relations entre débit liquide et vitesse de l'eau ne sont pas connues ici, d'autant plus que les débits mesurés concernent l'ensemble du Petit Rhône. Des vitesses de courant locales ont pu être indépendantes du débit global mesuré. Finalement, il pourrait exister une corrélation positive « indirecte » entre les débits liquides et la granularité des sables déposés sur les rives du Petit Rhône, mais la question reste à affiner, notamment en ce qui concerne la charge relative de l'eau lors des deux crues.

L'analyse granulométrique de la fraction fine a révélé un enrichissement de la phase limono-argileuse dans la plaine d'inondation du Petit Rhône lors de la crue de janvier 1994. Deux hypothèses peuvent être avancées. La première envisage des débits solides enrichis en fines en 1994. La seconde fait intervenir un remaniement des fines déposées en 1993.

### III - LES FACTEURS DU «PIEGEAGE» SEDIMENTAIRE. APPLICATION DE L'ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIEE

Cette partie est consacrée à l'analyse des facteurs du piégeage sédimentaire sur les rives du Petit Rhône. Il s'agit en fait de différencier les paramètres physiques contrôlant la sédimentation d'une partie de la charge alluvionnaire sur les rives du fleuve et leur distribution dans l'espace fluvial.

La recherche de corrélations entre certains points géographiques des cours d'eau et des paramètres hydrauliques a été abordée par plusieurs auteurs (Sahu, 1964; Lee *et al.*, 1978; Cheetham, 1979; Zwolinski, 1992). La méthode statistique retenue ici s'est appuyée sur l'analyse en composantes principales qui a permis de caractériser et hiérarchiser les facteurs de la sédimentation fluviale (Sanders, 1989; Thioulouse, 1990). Cette analyse factorielle s'articule en sept étapes: liste des variables, collecte des données, traitement des données, analyse critique des variables retenues, matrice des données, analyse statistique multivariée et vérification *in situ* des résultats obtenus. La matrice des données comporte 10 observations (c'est-à-dire les sites d'étude). Sur les 61 variables répertoriées, 21 ont été retenues, faisant référence à l'hydrologie, la topographie, la sédimentologie et la végétation (tab. 2). L'analyse de la variance indique que le poids cumulé des quatre facteurs retenus est satisfaisant, ceux-ci représentant 80,4 % de l'information totale contenue dans la matrice des données.

#### 1 - L'AXE FACTORIEL 1

Cet axe factoriel résume à lui seul 37,4 % de l'information totale. En soulignant le rapport étroit existant entre la hauteur d'eau atteinte lors des deux crues, la largeur du chenal et la répartition des volumes de sédiments entre l'amont et l'aval du cours d'eau, ce facteur met en fait en évidence

THEMES	CODES	VARIABLES	DEGRES		
Hydrologie	1	Situation du transect	1. Section amont	2. Section médiane	3. Section aval
	2	Rive	1. Convexe	2. Concave	
	3	Position dans le méandre	0. Tracé subrectiligne	1. Tête	2. Partie médiane
	4	Hauteur d'eau maximale atteinte par la crue	3. Partie finale		
	5	Profondeur maximale du chenal (spécifique à la rive)	(en m N.G.F)		
	6	Profondeur absolue du chenal	(en m)		
	7	Largeur entre les digues	(en m)		
	8	Largeur du chenal	(en m)		
Topographie	9	Altitude de la levée de berge	1. < 2m N.G.F	2. 2-3 m N.G.F	1. 3-4 m N.G.F
	10	Pente de la levée de berge	1. Faible (< 10%)	2. Moyenne (10-30%)	3. Forte (> 30%)
	11	Pente longitudinale du lit	1. Faible	2. Moyenne	3. Forte
	12	Rupture de pente longitudinale du lit	0. Absence	1. Présence	
Végétation	13	Taux de recouvrement de la ripisilve	1. Faible	2. Moyen	3. Fort
	14	Épaisseur de la séquence en 1993	(en cm)		
Sédimentologie	15	Mode des sables le plus fréquent de la levée de berge en 1993	1. 63-50 microns	2. 100-80 microns	3. 160-125 microns
	16	Volume total de sédiments déposé en 1993	4. 250-200 microns	5. 315 microns	
	17	Volume total de sables déposé en 1993	(en m3)		
	18	Épaisseur de la séquence en 1994	(en cm)		
	19	Mode des sables le plus fréquent de la levée de berge en 1994	1. 63-50 microns	2. 100-80 microns	3. 160-125 microns
	20	Volume total de sédiments déposé en 1994	4. 250-200 microns	5. 315 microns	
	21	Volume total de sables déposé en 1994	(en m3)		

Tab. 2: Liste des variables.  
Tab. 2: List of variables.

«l'effet de chasse» des sédiments du chenal vers les rives du fleuve (fig. 12).

Nous distinguons d'une part les stations situées dans la partie amont du fleuve. La largeur (comprise entre 114 et 120 m) et la profondeur (comprise entre 4,32 et 7,32 m) du chenal sont plus faibles qu'à l'aval. La hauteur d'eau relative est plus importante (de 6,02 à 6,56 m). La conjugaison de ces trois paramètres a favorisé une accumulation considérable de sédiments sur les rives du fleuve. Ici, le rétrécissement du chenal ainsi que la diminution de sa profondeur entraîne un accroissement de la vitesse locale de l'eau, favorisant alors une «chasse» des sédiments du chenal vers les berges du fleuve. De plus, l'augmentation de la hauteur d'eau relative renforce le caractère «débordant» de la crue dans le tronçon et accroît ainsi le volume de matériel sédimentaire déposé.

Le facteur oppose à ce groupement des stations situées dans la partie aval où la largeur et la profondeur du chenal sont maximales (largeur comprise entre 136 et 200 m, profondeur comprise entre 5,3 et 14,7 m). La hauteur d'eau relative atteinte au cours des deux crues est moins importante (de 1,91 à 3,97 m). Les volumes sédimentaires déposés sur les rives sont plus réduits. L'élargissement du chenal ainsi que l'accroissement de sa profondeur entraînent la réduction de la vitesse du courant dans le méandre consécutive à l'étalement de la colonne d'eau. Les sédiments se déposent dans le fond du chenal et non plus sur les rives du fleuve. Le matériel sédimentaire est également moins abondant en milieu émergé du fait de la plus faible côte relative atteinte par les eaux de crue.

## 2 - L'AXE FACTORIEL 2

Cet axe résume 22,8 % de l'information totale. Il oppose deux facteurs de contrôle du piégeage sédimentaire sur le Petit Rhône en terme de granularité des dépôts: les ruptures de pente du profil en long et la largeur entre les digues du cours d'eau (fig. 12).

Un premier groupement isole des sites caractérisés par une vaste plaine d'inondation en relation avec une largeur entre les digues très importante (entre 180 et 305 m). Le

volume de matériel alluvionnaire fin est considérable par suite de l'étalement de la colonne d'eau et de la réduction du débit dans la plaine d'inondation. L'élargissement du lit du cours d'eau accroît le volume proportionnel de sédiments fins. L'effet de peignage partiel de la charge sableuse par la ripisilve au niveau de la levée de berge contribue à renforcer la finesse des dépôts dans la plaine d'inondation proximale.

Le deuxième groupe de sites est marqué par la rupture de la pente longitudinale du profil en long. La diminution de la pente favorise le dépôt du matériel sableux transporté, créant ainsi une suraccumulation à l'aval de la rupture de pente et une augmentation de la taille des grains. Les sites concernés sont caractérisés par un renforcement du mode sableux le plus fréquemment rencontré au sein des levées de berge (100-80 microns).

## 3 - L'AXE FACTORIEL 3

Les facteurs du piégeage sédimentaire énoncés ici ne résument que 13 % de l'information totale. L'épaisseur des séquences sédimentaires en rive concave est fonction de deux paramètres: la position des stations dans les méandres et la hauteur des berges (fig. 13). Ce facteur isole d'une part les stations situées dans la partie aval des méandres. Celles-ci sont caractérisées par des berges hautes (hauteur comprise entre 3 et 5 m). Le renforcement de la hauteur des berges peut ici s'expliquer par une exposition moindre à l'érosion, les parties les plus facilement remaniables étant situées en tête du méandre. L'épaisseur des séquences sédimentaires (comprise entre 0 et 3,8 cm) est plus faible, par suite du dépôt partiel de matériel en amont du méandre et de la position plus importante du sommet de la levée.

D'autre part, les stations situées en amont du méandre sont caractérisées par des berges de moindre hauteur (hauteur comprise entre 1,5 et 3 m), résultant du décapage de la levée à chaque crue du fleuve. L'épaisseur des séquences sédimentaires (comprise entre 3,1 et 35 cm) est plus importante.

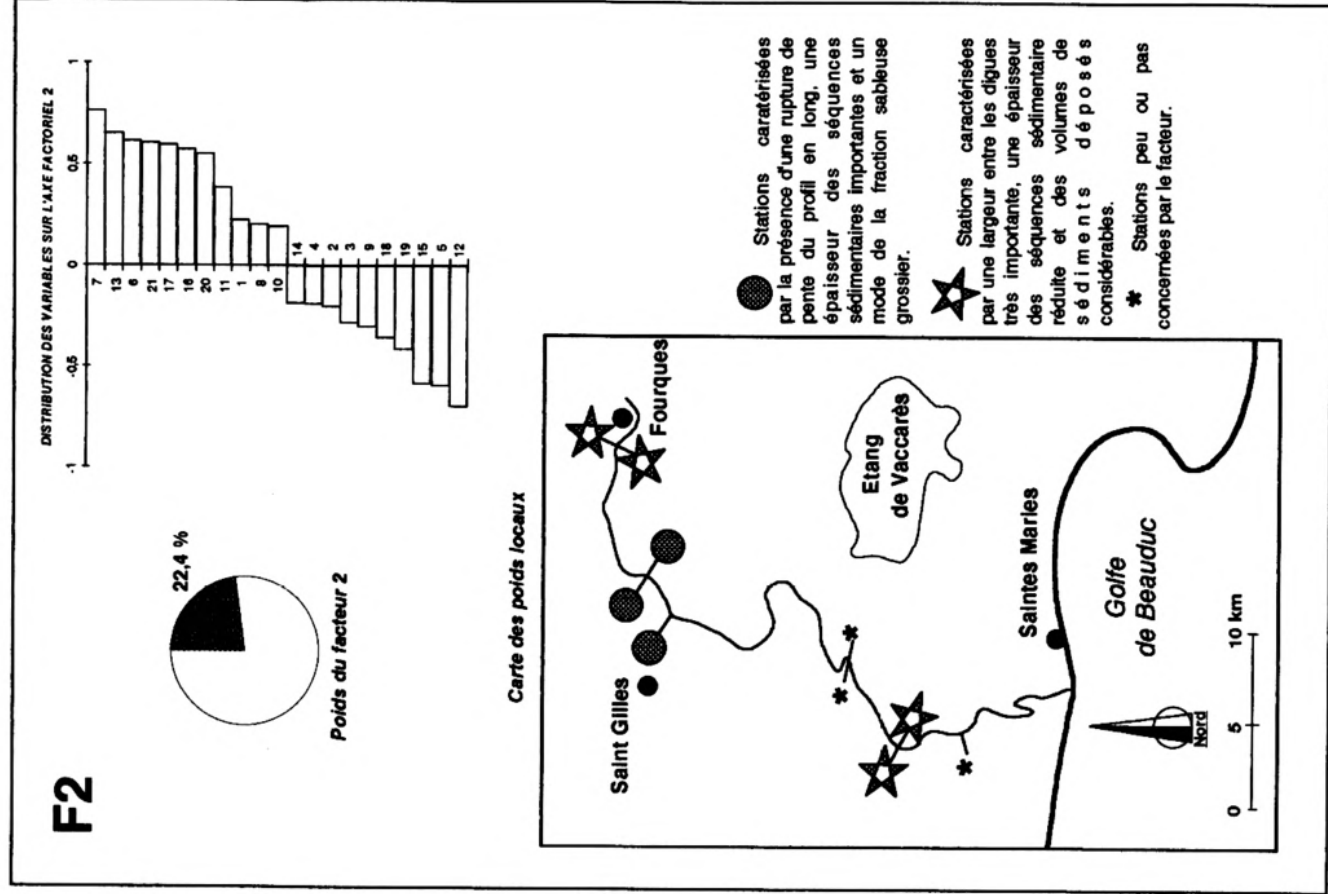
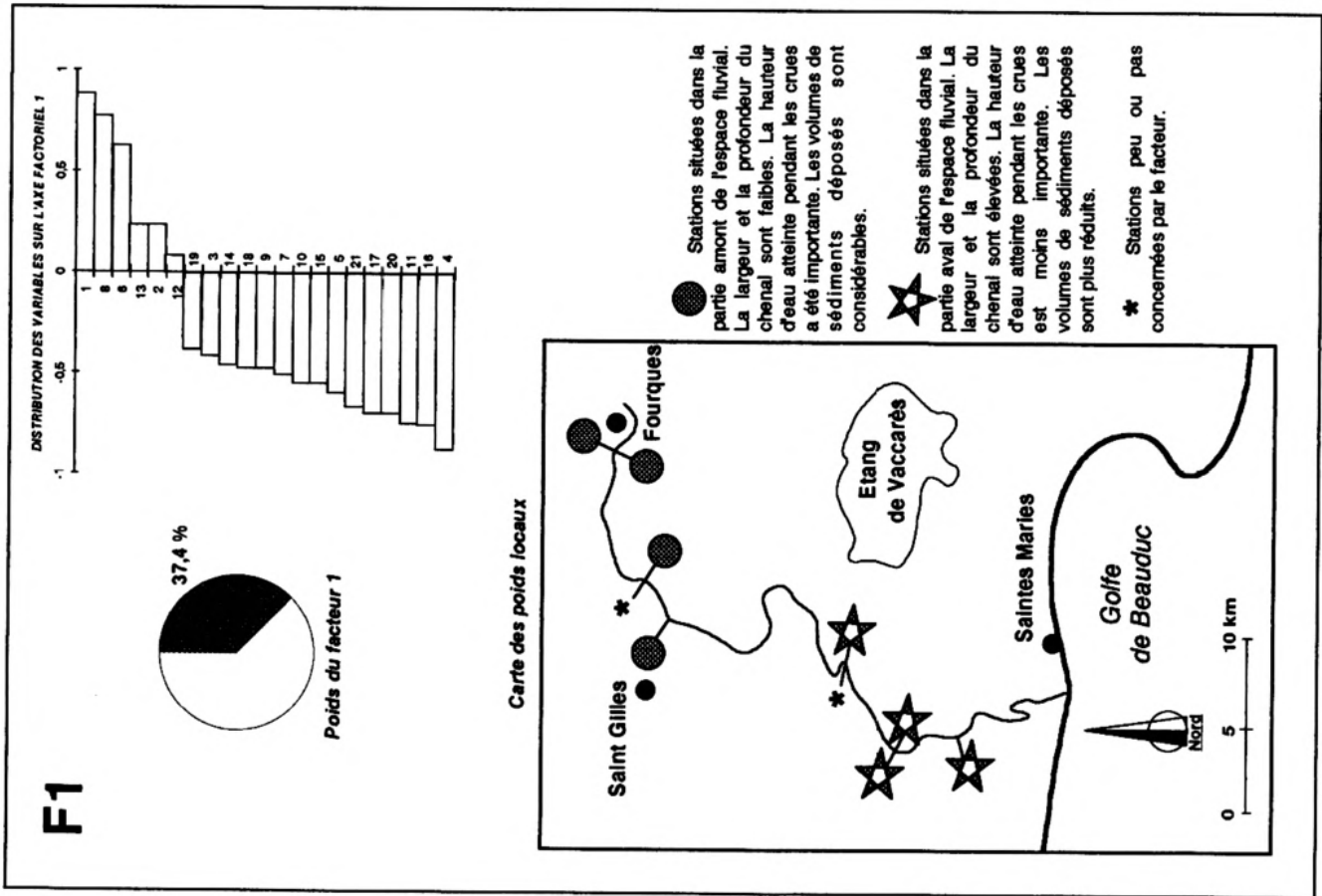


Fig. 12: Discrimination des facteurs du piégeage sédimentaire à partir des axes factoriels 1 et 2.  
Fig. 12: Discrimination of sedimentary trapping factors using factorial axes (1 et 2).

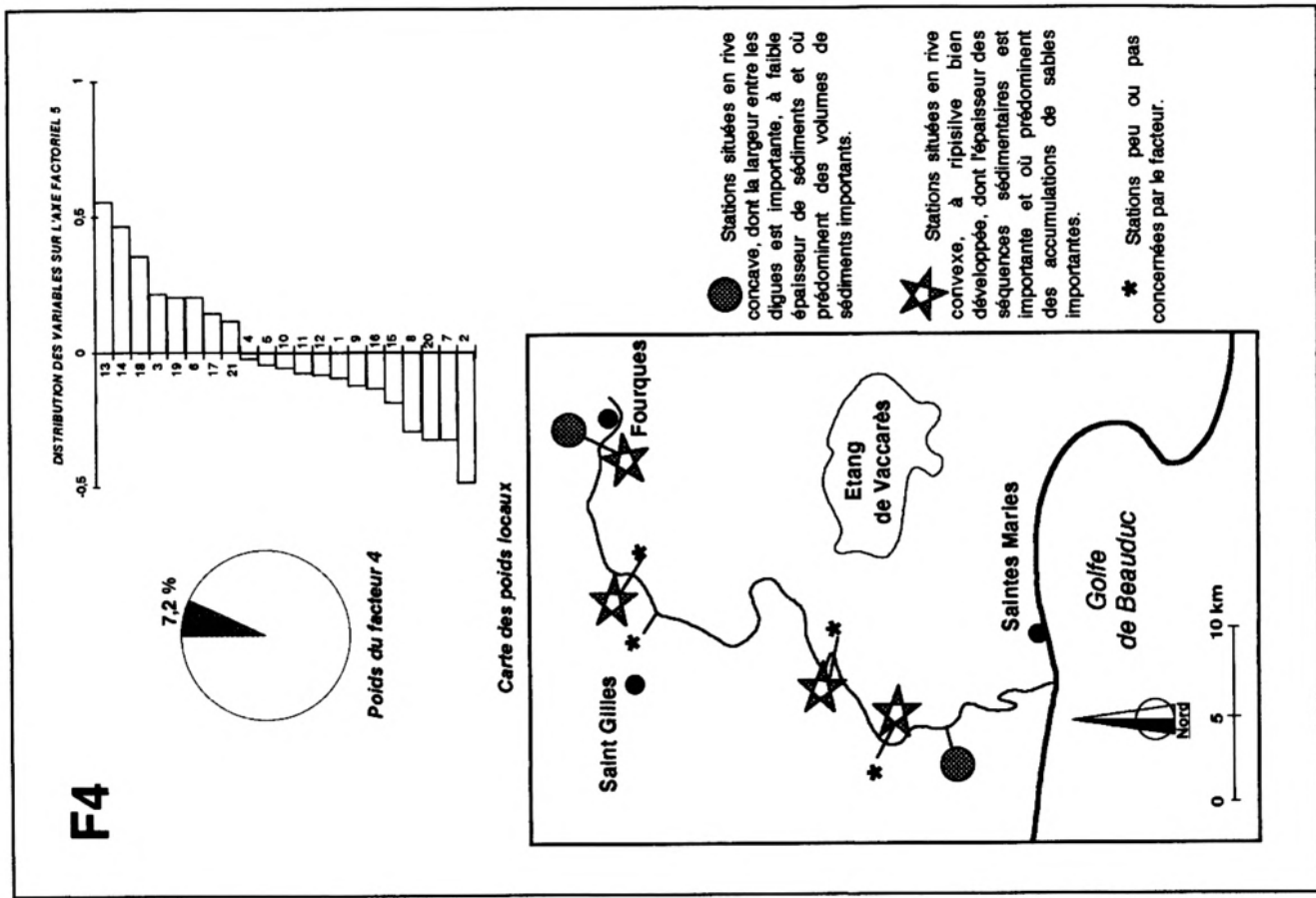
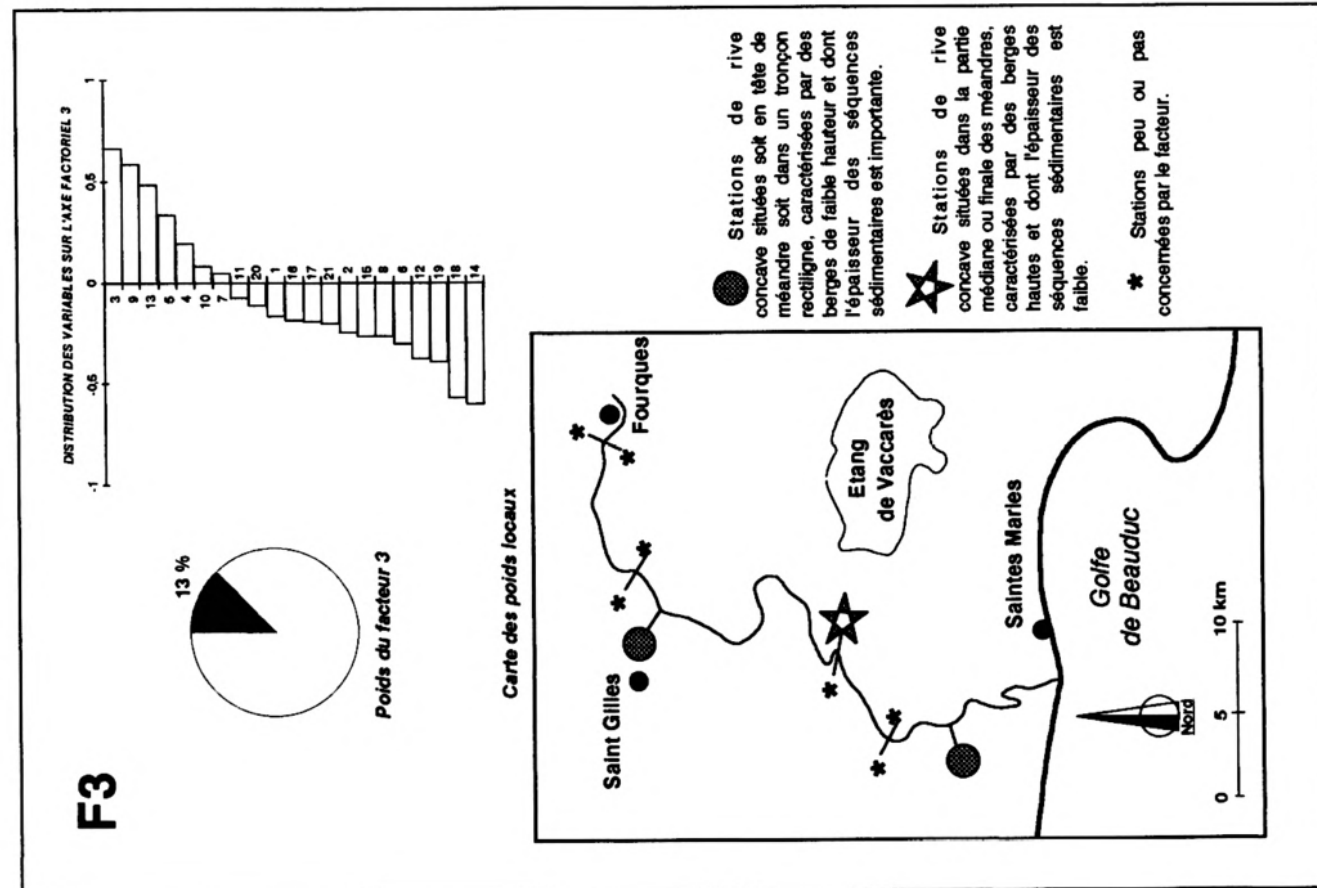


Fig. 13: Discrimination des facteurs du plégage sédimentaire à partir des axes factoriels 3 et 4.  
 Fig. 13: Discrimination of sedimentary trapping factors using factorial axes (3 et 4).

## 4 - L'AXE FACTORIEL 4

Représentant 7,2 % de l'information totale, cet axe oppose les fortes accumulations de sédiments fins et grossiers. Les deux facteurs du piégeage sédimentaire retenus sont respectivement la rive concave et la ripisilve (fig. 13). Un premier groupement isole les stations à forte accumulation de sédiments fins. Ils sont localisés en rive concave. La largeur entre les digues est importante ainsi que le volume de sédiments déposés. L'épaisseur des séquences sédimentaires est réduite par suite de l'étalement sédimentaire dans la plaine d'inondation. Un second groupement isole les stations où prédominent de fortes accumulations en sédiments grossiers. Ces stations sont situées en rive convexe et de surcroît là où la ripisilve est bien développée. L'épaisseur des séquences sédimentaires est importante.

Cet axe révèle en fait deux facteurs de piégeage: un premier facteur lié à l'effet de rive convexe combinée à la ripisilve qui, par effet de peignage, favorise le piégeage des sables et un deuxième facteur lié à l'extension de la plaine d'inondation en rive concave qui contribue à de fortes accumulations de sédiments (fins).

## CONCLUSION

L'analyse quantitative des sédiments accumulés sur les rives du Petit Rhône au cours des deux crues 1993-1994, associée à leur étude qualitative, a permis d'apprécier la nature du *stockage sédimentaire* et les types de dynamique fluviale à l'origine des dépôts.

Cette étude contribue à une meilleure connaissance de la production sédimentaire totale sur la plaine deltaïque rhodanienne. Elle a permis de souligner l'importance du piégeage rivulaire sur le Petit Rhône, celui-ci atteignant 0,65 Mt (T.D.S de 6,8 t / km<sup>2</sup> / 42 j) en 1993 et à 1,37 Mt (T.D.S de 14,4 t / km<sup>2</sup> / 42 j) en 1994. Au cours de la première période, nous savons que 12 Mt de M.E.S ont transité dans les deux bras du Rhône sur le delta, soit un T.D.S égal à 125,7 t / km<sup>2</sup> / 42 j (Pont D., communication orale). La charge de fond a été estimée à 3 et 4 Mt (Nakato, 1990; Van Rijn, 1984).

La comparaison des deux événements exceptionnels 1993-1994 a permis de mettre en évidence des contrastes hydrosédimentaires notables. Elle révèle que les caractères dominants de la crue de janvier 1994 par rapport à celle d'octobre 1993 sur les rives du fleuve sont (i) un volume de sédiments plus important, (ii) un matériel sableux plus grossier et (iii) un apport en fines supérieur dans la plaine d'inondation.

Cette étude contribue également à dresser un bilan de l'alimentation potentielle de l'aire deltaïque. Les résultats obtenus ont montré que la quantité de sédiments sableux accumulés le long des rives du Petit Rhône était suffisante pour constituer un *stockage* potentiel utile à l'engraissement des plages camarguaises occidentales. Une partie seulement de ces sables seront remobilisables par les crues. Seuls certains stocks issus de milieux alluvionnaires très proches du chenal actif, tels que les bancs médians et les chenaux émergés à l'étiage et dans une moindre mesure les levées de berge, pourront connaître des processus de remaniement et atteindre, au cours de transferts sédimentaires plus ou moins longs, l'embouchure occidentale du delta du Rhône.

## REMERCIEMENTS

L'auteur remercie J.-P. Bravard, J.-J. Macaire, M. Marzey, M. Provansal et C. Vella de leurs suggestions qui ont permis d'améliorer son texte. L'auteur remercie également D. Coutaz, D. Jouve et M. Cortinovis de la *Compagnie Nationale du Rhône* ainsi que J.-C. Aloisi et P. Barthe pour l'aide apportée à la réalisation des analyses gamma-densimétriques et radiographiques.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme de recherche MEDDEL (Etude comparative entre les deltas de l'Ebre, du Pô et du Rhône). Cette étude est financée par la Communauté Européenne (Environnement Research Programm, Directorate General for Science, Research and Development under Contracts N°EV5V-CT94-0465).

## BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN, G. P., 1989 - Les deltas et les bassins deltaïques. In: *Dynamiques et méthodes d'étude des bassins sédimentaires*, Association des sédimentologues français, 383-419.
- BARTHURST, J. C., 1979 - Distribution of boundary shear stress in rivers. In: *Adjustments of the fluvial system*. Rhodes et Williams (Ed.) Kendall Hunt Publishing Co., Dubuque, Iowa, 95-116.
- BRAVARD, J. P. et GILVEAR, D. J., 1993 - Structure hydrogéomorphologique des hydrosystèmes. In: *Hydrosystèmes fluviaux*, Masson (Ed.), Paris, 83-103.
- BRAVARD, J. P., 1983 - Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône (approche qualitative et spatiale). *Rev. Géogr. Alpine*, 71, 363-379.
- BRAVARD, J. P., AMOROS, C. et JACQUET, C., 1986 - Reconstitution de l'environnement des sites archéologiques fluviaux par une méthode interdisciplinaire associant la géomorphologie, la zoologie et l'écologie. *Rev. Archéométrie*, 10, 43-55.
- CAMARGUE (Collectif), 1970 - *Etude hydrogéologique, pédologique et de salinité*. D.D.A et C.N.A du Bas-Rhône et du Languedoc-Arles. Rapport collectif en plusieurs volumes.
- CHAMLEY, H., 1988 - *Les milieux de sédimentation*. Lavoisier, Editions du B.R.G.M, Paris, 173 p.
- CHEETHAM, G. H., 1979 - Flow competence in relation to stream channel form and braiding. *Geol. Soc. of America Bull.*, 1, (90), 877-886.
- COTTEREAU, C., 1988 - Leçons tirées de l'aménagement du Rhône sur l'hydrobiologie, la qualité de l'eau et le débit solide. *Commission internationale des grands barrages, XVIIe Congrès des grands barrages, San-Francisco*, 53-83.
- DUGAS, F., 1989 - *Etude du transit sédimentaire par charriage dans le Rhône entre Beaucaire et Arles*. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération et Compagnie Nationale du Rhône, Montpellier, 65 p.
- KESEL, R. H., DUNN, R., McDONALD, C. et ALLISON, K. R., 1974 - Lateral erosion and overbank deposition in the Mississippi River in Louisiana caused by 1973 flooding. *Geology*, 2, 461-464.
- LEE, L.J. et HENSON, B.L., 1978 - The longitudinal river, valley, and regional profiles of the Arkansas river. *Z. Geomorph. N.F.*, 22, (2), 182-191.
- LEWIN, J., 1978 - *Floodplain geomorphology*. PPG, 408-435.
- MACAIRE, J. J., 1990 - L'enregistrement du temps dans les dépôts fluviaux superficiels: de la géodynamique à la chronostratigraphie. *Quaternaire*, 1, (1), 41-49.
- Mc CARTHY, T. S., STANISTREET, I.G. et CAIRNCROSS, B., 1991 - The sedimentary dynamics of active fluvial channels on the Okavango fan, Botswana. *Sedimentology*, 38, 471-487.
- MANICKAM, S. et BARBAROUX L., 1987 - Variations in the surface texture of suspended quartz grains in the Loire River: an SEM study. *Sedimentology*, 34, 495-510.

- MOORE, D., 1966 - Deltaic sedimentation. *Earth Sci. Rev.*, 1, 87-104.
- MORGAN, J. P., 1970 - Depositional processes and products in the deltaic environment. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ.*, 15, 31-47.
- NAKATO, T., 1990 - Tests of selected sediment-transport formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116, (3), 362-379.
- PASSEGA, R., 1957 - Texture as characteristics of clastic deposition. *American Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 41, (9), 1952-1964.
- PEIRY, J. L., 1988 - *Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments d'un cours d'eau intra-montagnard: l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve (Haute-Savoie)*. Thèse Université Lyon III, 378 p.
- PIZZUTO, J. E., 1987 - Sediment diffusion during overbank flows. *Sedimentology*, 34, 301-317.
- REINECK, H.E. et SINGH, I. B., 1980 - *Depositional sedimentary environments*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 551 p.
- RODITIS, J.C. et PONT, D., 1993 - Dynamiques fluviales et milieux de sédimentation du Rhône à l'amont immédiat de son delta, *Méditerranée*, 3, (4), 5-18.
- RUSSEL, R. J., 1967 - River and delta morphology. Baton Rouge, Louisiana State University, *Coastal Studies Institute, Tech. Rept.*, 52, 49 p.
- SAHU, B. K., 1964 - Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34, 73-83.
- SANDERS, L., 1989 - *L'analyse statistique des données en géographie*. Reclus, 267 p.
- SAVEY, P. et DELEGLISE, R., 1967 - Les incidences de l'aménagement du tiers central du Bas-Rhône sur les transports solides par charriage. *Ass. Internat. Hydrol. Scient.*, 449-461 et 462-746. nt
- SCHUMM, S. A., 1977 - *The fluvial system*. J. Wiley and sons (Eds.), New-York, 338 p.
- THIOULOUSE, J., 1990 - Macmul and Graphmu: two Macintosh programs for the display and analysis of multivariate data. *Computers and Geosciences*, 8, 1235-1248.
- TORMOS, E., CORNIER, P. et SCOTTI, M., 1989 - Influence d'une chaîne d'aménagements hydroélectriques sur le transport solide en rivière (charriage et suspension). Application au tiers central du Bas-Rhône français. *La Houille Blanche*, 3, (4), 215-220.
- VAN RIJN, L. C., 1984 - Sediment transport, part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, (10), 1431-1456.
- ZWOLINSKI, Z., 1992 - Sedimentology and geomorphology of overbank flows on meandering river floodplains. *Geomorphology*, 4, 367-379.