

Le croisement d'approches naturalistes et historiques dans l'étude de l'histoire des fleuves: le cas du Rhône français

Mireille PROVANSAL et Jean-Paul BRAVARD

Le Rhône, entre Genève et la mer

Depuis 150 ans, les modifications du régime fluvial et la réduction des apports sédimentaires issus du bassin versant, ainsi que les aménagements volontaires des lits ont complètement modifié le fonctionnement de l'hydrosystème fluvial, aboutissant à une «métamorphose» du chenal et des «marges» alluviales du Rhône français. L'ajustement du fleuve à ces mutations a été rapide et important en raison de son énergie et de sa capacité élevée de transport. Ces dernières sont liées à la pente du profil en long, qui ne s'affaiblit réellement qu'à l'aval (0,10‰ entre Arles et la mer) et au débit (module: 400 à 600 m³/s entre la Suisse et Lyon, 1000 à 1700 m³/s entre Lyon et la mer, avec des crues dépassant 5000 m³/s à Lyon, 11 500 m³/s à Beaucaire). La réponse morphologique du fleuve est également conditionnée par le contexte litho-structural local et par sa position sur le continuum-aval. On distingue communément les trois segments suivants: le haut Rhône (français), de la frontière suisse à Lyon, contraint par la traversée des structures plissées des Alpes et du Jura et par un héritage glaciaire important, le Rhône «moyen» de Lyon à Avignon, caractérisé par une succession de bassins et de défilés, et le Rhône «aval», d'Avignon à la mer, dont la plaine s'élargit jusqu'à former un grand delta. La position des grands aménagements (barrages hydro-électriques) et des confluences, qui rechargent le chenal en sédiments grossiers, introduit une segmentation supplémentaire importante. La figure 1 présente la discontinuité géomorphologique amont-aval dans les années 1860, avant la période des grands aménagements; elle met en évidence le rôle des principaux affluents dans le développement du style en tresses.

Cet article propose une sélection d'approches scientifiques et opérationnelles développées depuis une trentaine d'années le long du Rhône. Les travaux ont débuté à Lyon en 1979 dans le cadre du PIREN-Rhône (programme interdisciplinaire en environnement); depuis 2001, ils se poursuivent conjointement dans le cadre de deux zones ateliers (ZA) du CNRS: la ZA Bassin du Rhône (Lyon) et la ZA ORME (pôle aixois) pour la partie aval du fleuve. Les questions retenues dans cette présentation sont les suivantes:

- Quelle était la relation établie entre les sociétés rurales traditionnelles et le fleuve avant l'époque industrielle?
- Quelles ont été les transformations de l'hydrosystème fluvial depuis 150 ans?
- Quels sont les déterminants physiques de l'aléa et de la vulnérabilité à la surface du lit majeur?

Enfin, quelles sont les démarches en cours qui visent à la réhabilitation des marges alluviales?

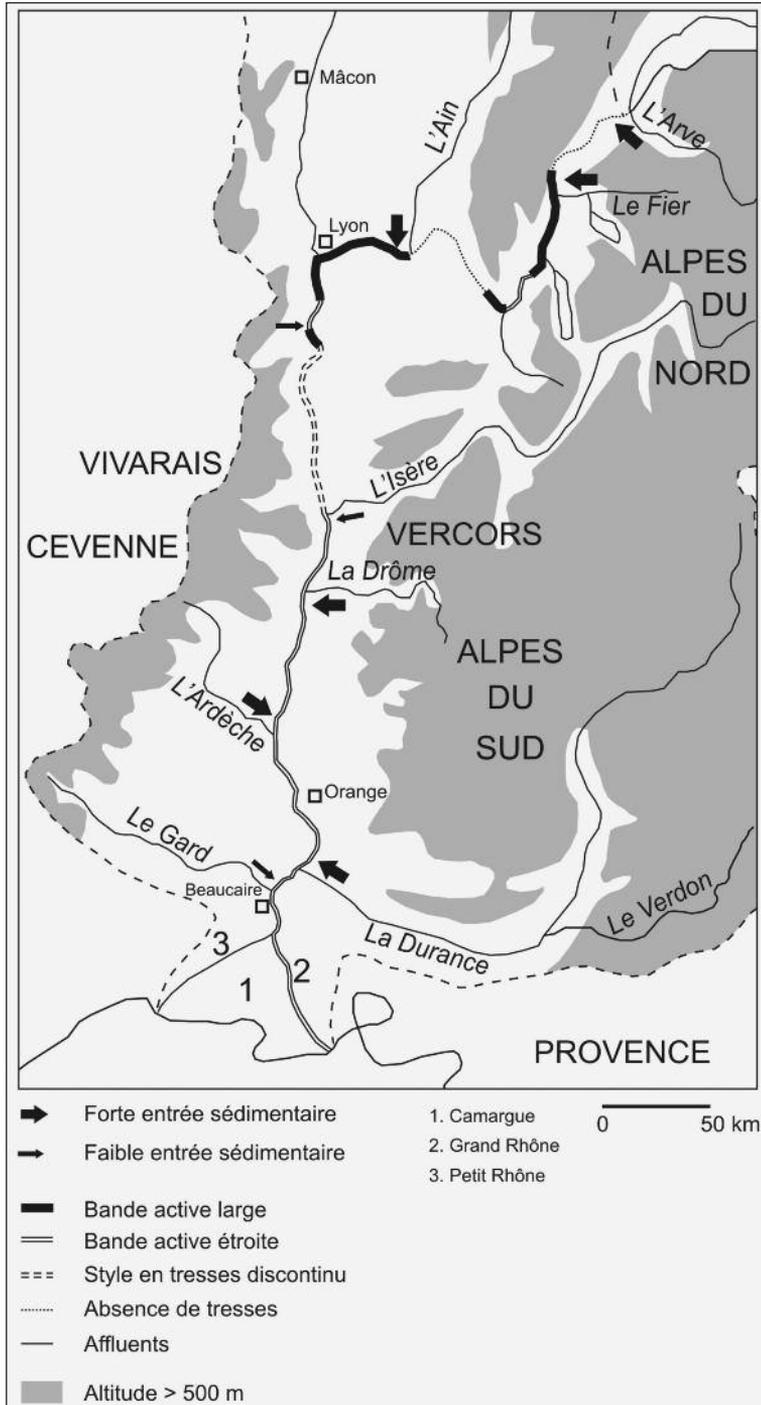


Fig. 1. Le Rhône entre Genève et la mer: les styles fluviaux à la fin du Petit Age Glaciaire, présentation schématique.

Etant données la taille de la zone étudiée et les disparités spatiales à l'échelle de la vallée du Rhône, cette présentation mettra l'accent sur les secteurs les plus significatifs ou les mieux connus.

Environnement fluvial et sociétés montagnardes du haut Rhône: l'exemple de la Chautagne au XVIII^e-XIX^e siècles

Les tresses du haut Rhône montagnard

Des travaux de géographie historique ont été réalisés sur le haut Rhône pour comprendre les relations que les communautés riveraines entretenaient avec le Rhône à une époque comprise entre le début du XVIII^e siècle et le début du XX^e siècle¹. Entre Genève et Lyon, le haut Rhône voit se succéder de l'amont vers l'aval plusieurs styles fluviaux directement liés à l'injection de charge de fond grossière par de grands affluents montagnards (Fig. 1). Le tronçon en tresses situé entre Seyssel et Groslée est sous le contrôle des apports sédimentaires de l'Arve, de la Valserine jurassienne, des Usses et du Fier savoyards (Fig. 2). Le secteur retenu est celui de la Chautagne qui est un petit «pays» qui s'étend des crêtes du premier chaînon

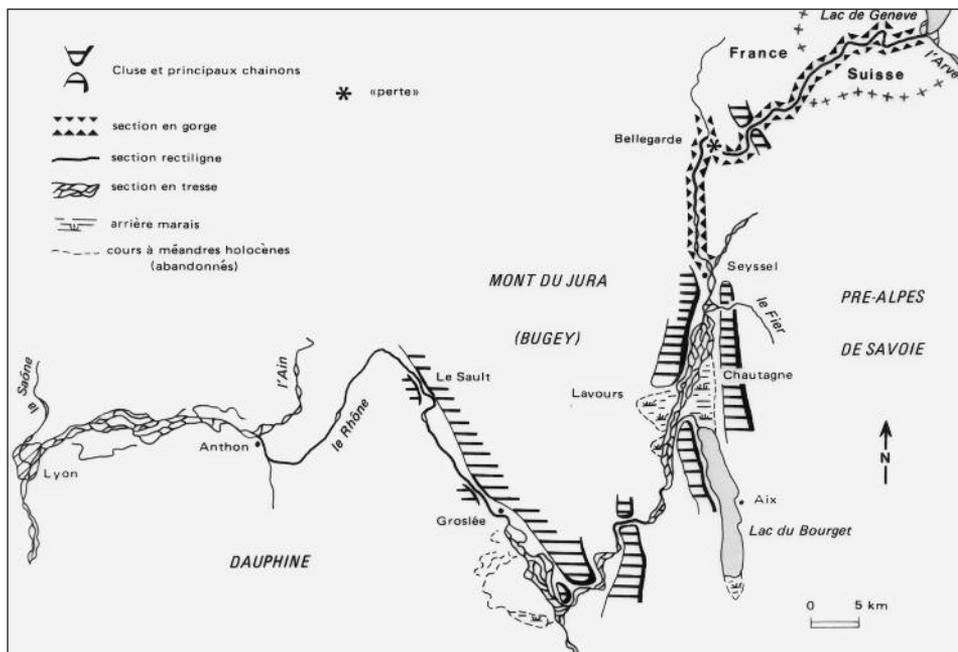


Fig. 2. Les styles fluviaux du haut Rhône.

¹ Jean-Paul BRAVARD, *La Chautagne. Dynamique de l'environnement d'un pays savoyard*, Lyon, 1981 (Institut des Etudes rhodaniennes, Mémoires et Documents, 18); Jean-Paul BRAVARD, *Le Rhône, du Léman à Lyon*, Lyon, 1986.

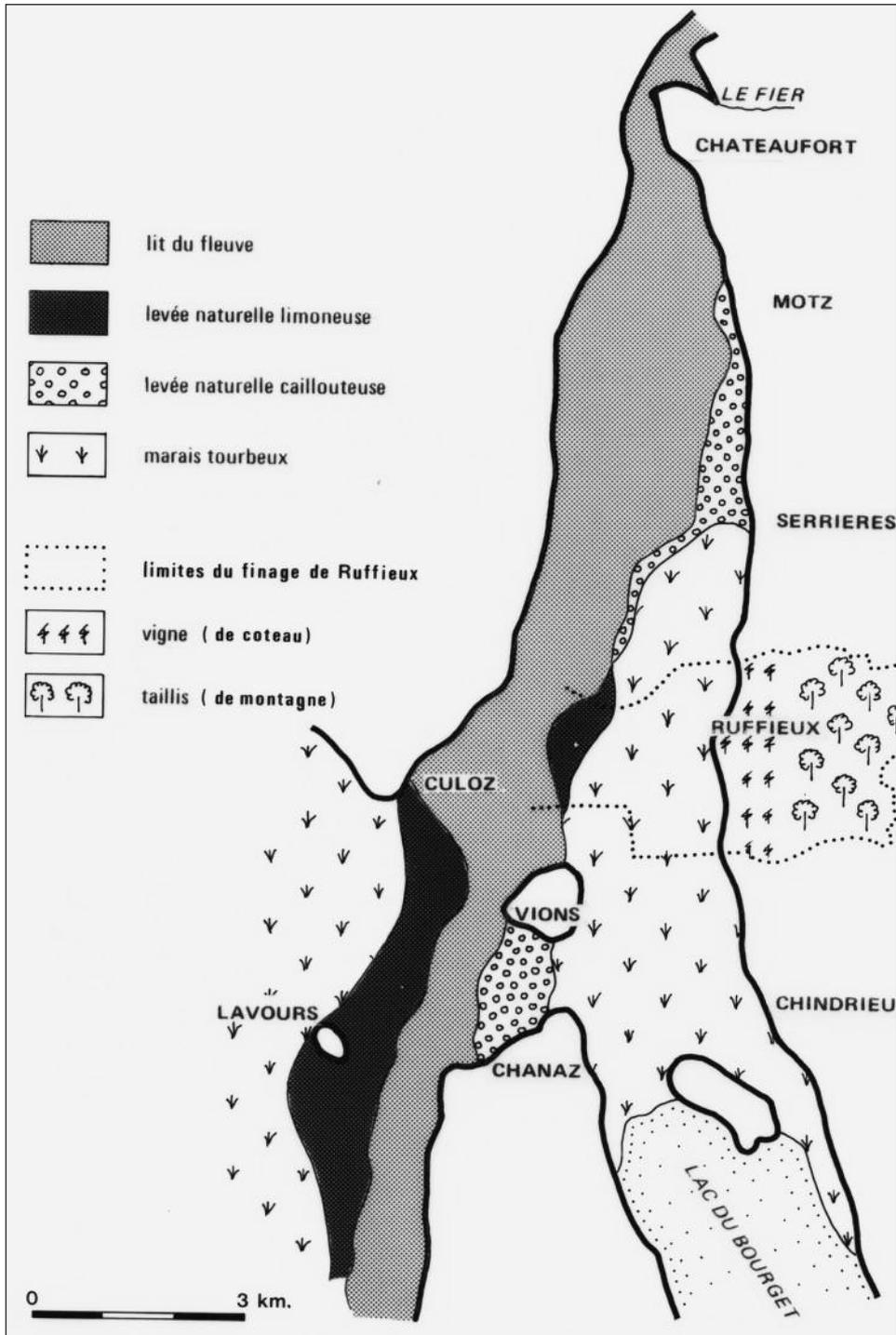


Fig. 3. Les terroirs de la Chautagne entre la montagne et le fleuve.

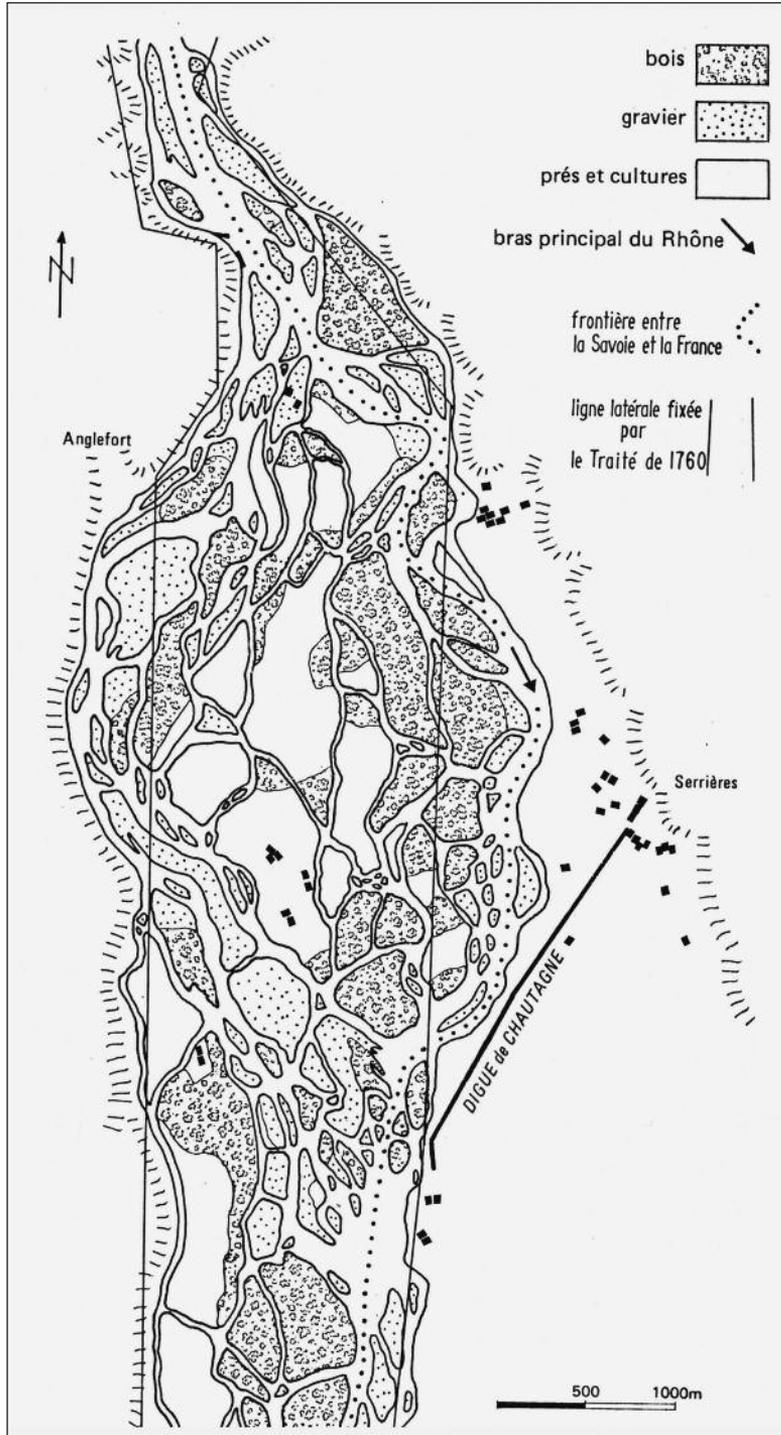


Fig. 4. Les tresses de la Chautagne.

savoyard (alt. 1000 m) jusqu'au Rhône (alt. 230 m). En marge du Rhône en tresses, le finage des paroisses pré-révolutionnaires et des communes qui leur ont succédé était organisé dans le cadre d'une complémentarité des terroirs très classique, qui rappelle fortement celle du Valais. Il juxtaposait des bandes parallèles au fleuve: les hautes pâtures du chaînon défriché, les médiocres taillis des versants calcaires, les riches terres labourées et plantées de vignes de la base des chaînons, le marais tourbeux et froid, la levée fluviale sableuse et les «brotteaux» (maigres taillis de saules pionniers broutés par les bovins) des îles du Rhône (Fig. 3). De fait, le Rhône développait en Chautagne un style en tresses remarquable puisqu'il avait une largeur de 3 km à l'aval de la confluence du Fier; la figure 4, qui reprend une carte de 1760², montre le chenal considéré comme principal, localisé à l'est de la «bande active», des îles relativement stables défrichées et pâturées et possédant quelques granges, et enfin à l'ouest un ancien lit actif à bancs de graviers non colonisés par la végétation. Ce basculement est classique dans les paysages de tresses. Les témoignages locaux font état de la progression vers l'est de la bande active dans le courant du XVIII^e siècle, au détriment des marais de Chautagne, ce qui explique la construction de digues de défense, comme celle de Chautagne. Il est démontré que le Rhône médiéval était un cours d'eau à méandres, ce qui souligne l'importance du Petit Age Glaciaire (PAG) dans la métamorphose du fleuve et pourrait donner un fondement au fait que les habitants de l'époque moderne aient prétendu assister à un changement du fonctionnement du fleuve. La carte de 1760 fut levée selon les termes d'un traité signé entre la France et la Savoie; les lignes «latérales» délimitent de manière virtuelle un espace intérieur intangible alors que les espaces extérieurs pourront être défendus par des digues longitudinales et reconquis sur le fleuve, ce qui fut fait dès 1780 côté savoyard.

Fonctionnement fluvial et agrosystème à l'époque moderne

Les relations construites entre la société rurale de la Chautagne et le Rhône ont été analysées dans une période charnière qui correspond en même temps à la fin du Petit Age Glaciaire et au début de la Révolution industrielle, cette dernière se manifestant en Chautagne par la généralisation des techniques modernes de protection. L'organisation du territoire et le mode de fonctionnement se font alors de part et d'autre de la base du coteau où se localisent les villages et les cultures riches que sont les céréales et la vigne; cet espace est contraint entre la montagne, siège du pâturage collectif et extensif, et le marais qui possède le même statut. Le marais est pâturé en automne et en hiver, protégé du bétail de mai à août pendant la période de pousse de l'herbe (la «blache» ou carex), puis fauché à la mi-août (Fig. 5). La valeur du foncier est en relation étroite avec les revenus que l'on peut tirer de ces terroirs qui diffèrent par leur fertilité et il n'est pas étonnant que les terres en vigne soient les plus chères. On note cependant que les terres en marais ont une certaine valeur; ce n'est

² Carte géométrique d'une partie du cours du Rhône depuis Genève jusqu'au confluent du Guyers pour servir à la nouvelle délimitation des Etats de France et de Savoie, 1760. Archives départementales de la Savoie, Chambéry, C625.

de crue déficiente et d'enfoncement du lit), puis érodée dans le nord de la plaine alluviale et en partie fossilisée à l'ouest au PAG. On ne sait pas si la tourbière fut cultivée au Moyen Age, mais au PAG elle était inondée plusieurs semaines par an, la bande active exhaussée par le dépôt des alluvions déversant aisément les crues dans le marais dont la tourbière était réactivée. Il en résulta probablement un réajustement des relations établies entre le coteau et la plaine: l'inondation de saison chaude interdisait la mise en culture mais, grâce au limon, restaurait la fertilité. L'équilibre entre les prélèvements opérés par le bétail et la fauche d'une part et la fertilisation fluviale d'autre part est à la base de la pérennité de la société moderne en Chautagne; cet équilibre relatif, très surveillé depuis les villages, était farouchement défendu par les paysans sans terre qui survivaient grâce au pâturage extensif (Fig. 7). Très conscients des facteurs physiques qui permettaient l'entretien de la production de blache, les paysans pauvres s'opposèrent avec succès à toute tentative d'endiguement et de bonification. La vie avec l'inondation, souhaitée par une large partie de la population, explique sans doute l'acceptation remarquable de la loi de 1858 qui interdisait tout endiguement à l'amont des villes françaises, singulièrement de Lyon³.

Le schéma de fonctionnement qui vient d'être présenté est représentatif des vallées alluviales alpines qui organisaient leur finage en fonction des étagements altitudinaux et qui ont connu une métamorphose fluviale d'époque moderne, celle du Petit Age Glaciaire. Le développement moderne du tressage dans le sillon rhodanien

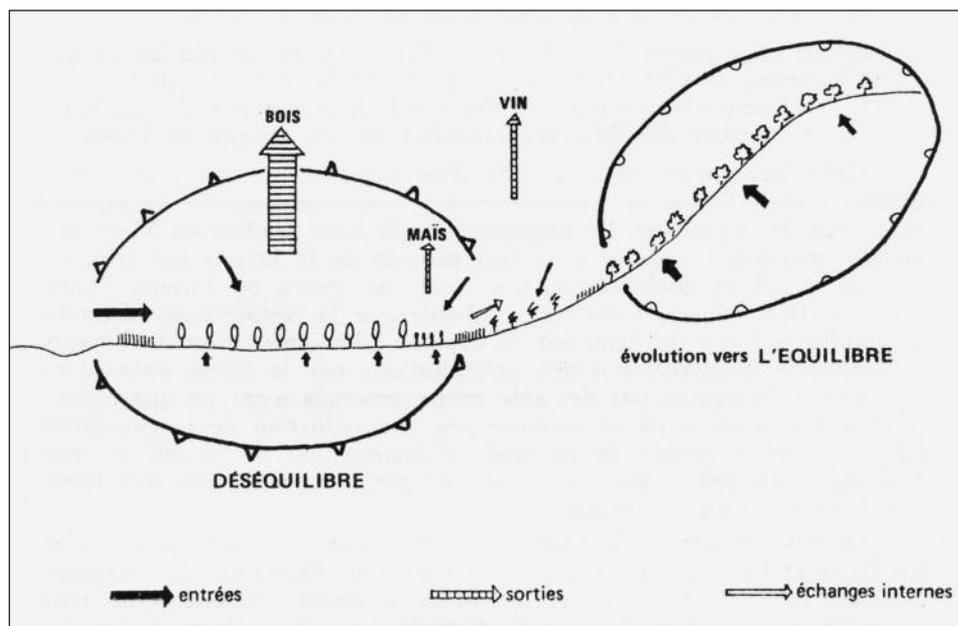


Fig. 7. Les bilans écologiques en Chautagne (fin du XIX^e siècle).

³ Jean-Paul BRAVARD, «Dynamiques naturelles et adaptations sociétales: histoire et gestion «durable» du risque d'inondation dans la vallée du Rhône», dans *Actes de Savoirs*, 8 (2007), p. 29-43.

a dû poser de plus redoutables problèmes aux riverains qui ne disposaient pas d'espaces complémentaires, privatifs ou collectifs, en altitude.

Le fonctionnement hydromorphologique et écologique du fleuve, quelle évolution depuis 150 ans? Quelles interactions avec les aménagements?

De l'abondance à la pénurie de charge de fond

La pluviométrie, en particulier les étés «pourris», et la bonne alimentation nivale, qui ont caractérisé le Petit Age Glaciaire, ont favorisé les crues fortes et fréquentes jusque dans la seconde partie du XIX^e siècle⁴. Les crues de 1840 et 1856 ont marqué les esprits et restent des événements de référence. Depuis le début du XX^e siècle, bien que le débit moyen annuel du fleuve soit resté stable⁵, la fréquence des fortes crues a diminué (peu ou pas d'événements exceptionnels entre 1960 et 1990), jusqu'à la recrudescence de la dernière décennie dans la partie aval du bassin (plus de 6 crues au moins cinquantennales de 1990 à 2003 à l'aval, contre une seule sur le haut Rhône). Les débits fluviaux et l'abondance de la charge solide dépendent également de la capacité de rétention hydrique des sols et de l'extension des couvertures forestières dans le bassin versant, elles-mêmes influencées par les modes de gestion agraires et la pression démographique rurale. De nombreux auteurs⁶ ont montré la diminution de la charge sédimentaire sur les affluents du Rhône, liée à la déprise agricole dans les Alpes et le Massif Central à la fin du XIX^e et dans la première moitié du XX^e siècle. Après la Seconde Guerre mondiale, les prélèvements des gravières et les ouvrages hydro-électriques ont interrompu ou réduit le transfert de la charge de fond, amplifiant cette évolution. A l'embouchure, les apports solides en suspension passent ainsi de plus de 50 Mt/an au début du XX^e siècle⁷ à moins de 8 Mt actuellement⁸: la stabilité de l'embouchure et du littoral proche s'en trouvent menacés⁹. Par ailleurs, l'aménagement du corridor fluvial, à partir du milieu du XIX^e siècle, a modifié les conditions du transfert sédimentaire: les endiguements

4 Georges PICHARD, *Espaces et Nature en Provence. L'environnement rural, 1540-1789*, Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille 1), 1999.

5 Christelle ANTONELLI, *Flux sédimentaires et morphogenèse récente dans le chenal du Rhône aval*, Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille 1), 2002.

6 Voir par exemple Frédéric LIEBAULT, Hervé PIÉGAY, «Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France», dans *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 (2002), p. 425-444; Cécile MIRAMONT, Xavier GUILBERT, «Variations historiques de la fréquence des crues et évolution de la morphogenèse fluviale en moyenne Durance (France, S.-É.)», dans *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 4 (1997), p. 325-338.

7 Maurice PARDE, *Le régime du Rhône, étude hydrologique*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 1925, 2 vol.

8 Didier PONT, Jean-Pierre SIMONNET, Anne WALTER, «Medium-term changes in suspended sediment delivery to the ocean: consequences of catchment heterogeneity and river management (Rhône river, France)», dans *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54 (2002), p. 1-18; Grégoire MAILLET *et al.*, «Transferts sédimentaires dans le Bas-Rhône depuis le milieu du 19^e siècle: essai de quantification», dans *Géographie physique et Quaternaire*, 61 (2007), p. 39-54.

9 Mireille PROVANSAL *et al.*, «Role of the fluvial sediment input in the mobility of the Rhône delta coast (France)», dans *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 4 (2003), p. 271-282.

contre les inondations ont segmenté le lit majeur à partir des années 1840-60; les ouvrages à courant libre, les casiers «Girardon»¹⁰ et la fermeture artificielle des bras secondaires ont contraint le lit mineur à se simplifier, se rétrécir et s'approfondir entre 1880 et 1930.

L'ensemble de ces mutations a induit un ajustement du chenal, dont l'énergie disponible, contrainte latéralement par les ouvrages, s'est dissipée dans l'érosion du plancher alluvial. La ripisilve s'est développée de façon considérable sur les «marges» moins fréquemment inondées: elle y a favorisé l'accumulation de sédiments fins et le colmatage des bras secondaires barrés. L'enfoncement du système phréatique lié au fleuve menace actuellement sérieusement sa survie. Au final, le paysage fluvial s'est profondément transformé en 150 ans. La mesure de ces transformations repose sur la combinaison de plusieurs méthodes. Une analyse diachronique¹¹ à partir d'archives cartographiques utilisables à partir des années 1860 (Cartes des Ponts et Chaussées) et de photographies aériennes (disponibles depuis 1947 jusqu'aux ortho-photos de l'Institut Géographique National (IGN) de 2008) a permis la reconstitution en 2D des variations de surface des différents types d'occupation du sol. Des analyses diachroniques en 3D, intégrant la bathymétrie, n'ont été réalisées que localement, compte tenu de la rareté de la documentation (carte bathymétrique de 1876 et relevés récents de la Compagnie nationale du Rhône (CNR)); l'approche 3D globale est limitée par l'intégration des données acquises de façon indépendante entre la plaine et le chenal. Les carottages réalisés dans les berges et les bras morts permettent de décrire les étapes et les modalités de l'évolution des marges alluviales, sur la base d'analyses sédimentaires¹². Les taux de sédimentation sont mesurés au moyen de deux marqueurs principaux: la dendrochronologie et les radio-isotopes (²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am), ces derniers étant liés à l'activité des centrales nucléaires en service sur le Rhône depuis le début des années 1950 (Marcoule et Tricastin dans la moyenne vallée du Rhône) et surtout depuis les années 1970 (Saint-Vulbas à l'amont de Lyon, puis Saint-Maurice-L'Exil et Cruas à l'aval). Ces documents et les travaux réalisés sur les formes et les sédiments hérités du fonctionnement holocène de la plaine alluviale ont permis de dresser un Atlas du paléo-environnement du Rhône français¹³.

Ces recherches ont montré que l'évolution récente de l'hydrosystème était marquée par des disparités spatiales, en fonction des contraintes structurales, du contexte climatique et sédimentaire des affluents et de la date des aménagements. On en présente ici deux cas, caractéristiques du Rhône amont et du Rhône aval.

¹⁰ Les casiers «Girardon», du nom de l'ingénieur qui les conçut et les mit en place, sont des digues longitudinales, raccordées à la berge par des tenons transversaux.

¹¹ Ces analyses ont été réalisées en utilisant le logiciel de système d'information géographique (SIG) ArcGIS, notamment son module 3D Analyst, pour les analyses en trois dimensions.

¹² Mireille PROVANSAL *et al.*, «High-resolution evaluation of recent bank accretion rate of the managed Rhone: a case study by multi-proxy approach», dans *Geomorphology*, 2009, sous presse.

¹³ Jean-Paul BRAVARD *et al.*, «Un atlas du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône de la frontière suisse à la mer», dans *Collection EDYTEM, Cahiers de Paléoenvironnement*, 6 (2008), p. 101-116.

La Chautagne: une nouvelle métamorphose par pénurie de charge de fond

Le lit du Rhône chautagnard a été endigué selon les prescriptions du traité de 1760 entre 1780 et 1858, date de l'achèvement de la voie ferrée Genève-Lyon; il a échappé à la phase d'endiguement réalisée sur le haut Rhône pour les besoins de la navigation dans les années 1880. La période 1860-1900 a connu une relative stabilité du style en tresses contenu entre les digues latérales, discontinues en rive gauche pour mieux laisser entrer l'eau dans le marais. Les modifications du fonctionnement et du paysage fluvial ont été amorcées dans les années 1900 du fait de la réduction des apports en charge de fond provenant de l'amont, provoquée par la construction de la chaîne des retenues hydroélectriques du Fier et par des extractions déjà massives vers 1930 dans la région genevoise et à Seyssel. La réduction de l'activité du tressage et l'enfoncement du lit se sont accentués après 1948, date de la mise en service du barrage de Génissiat qui stocke la totalité de la charge de fond du Rhône, puis par celle de la retenue de Seyssel qui stocke les apports des Usses. La figure 8 montre bien qu'en 1979 le tressage du Rhône ne remplit plus l'espace situé entre les

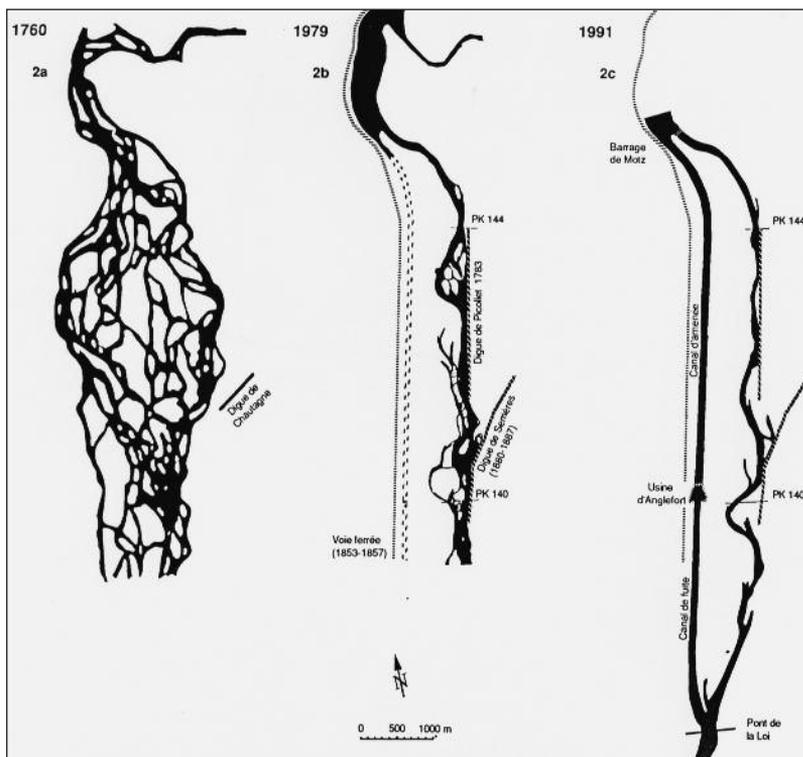


Fig. 8. Evolution de la géométrie en plan du Rhône chautagnard entre 1760 et 1991.

digues; à la même date est figuré le tracé du canal usinier de Chautagne construit par la Compagnie Nationale du Rhône (1979-1981) à l'intérieur même de cet espace, ce qui concrétise la contraction de l'espace d'activité fluviale. Le barrage de retenue de Motz bloque toute entrée de la charge de fond résiduelle dans le vieux Rhône.

Le déficit sédimentaire se matérialise assez rapidement par la disparition discrète et progressive des bancs alluviaux, par une tendance à la méandration et par l'incision du lit fluvial (localement jusqu'au niveau médiéval), conformément au schéma classique de l'évolution des lits fluviaux à l'aval des barrages; l'état du vieux Rhône en 1991 le montre avec netteté. La crue centennale de 1990 a été le révélateur de cette évolution qui menace les digues historiques, accentue le basculement du lit (érosion de l'amont du vieux Rhône et accumulation à l'aval) et aggrave localement les niveaux de crue. Une expertise géomorphologique réalisée après la crue a

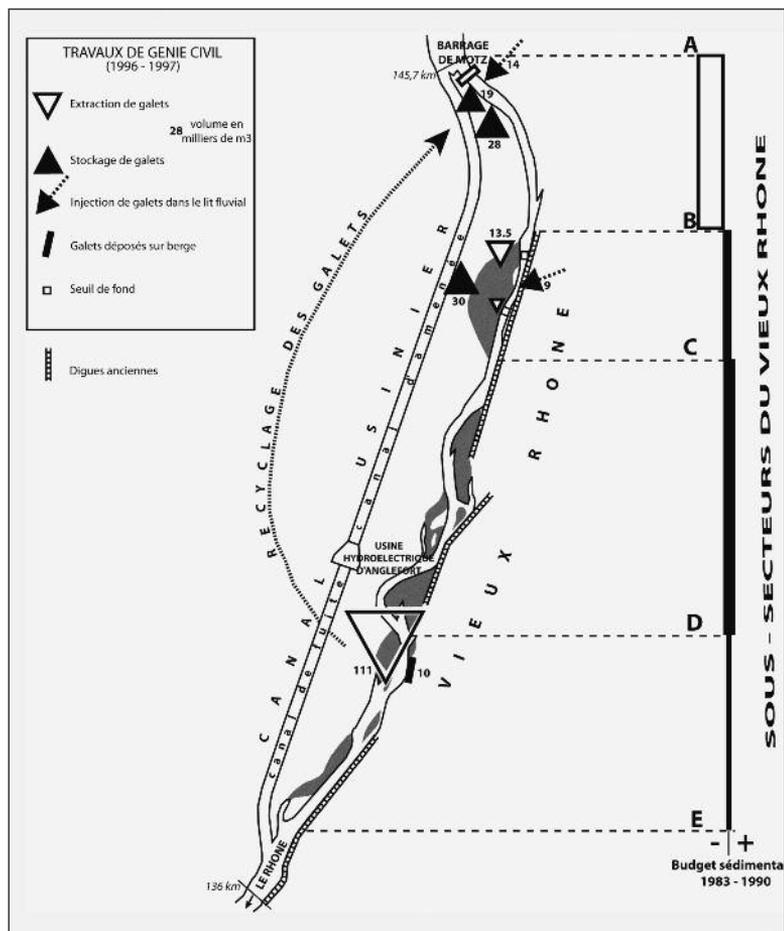


Fig. 9. Les travaux de la CNR après la crue de 1990.

conduit la CNR à mettre en œuvre dès 1996-97 une série de mesures de correction présentées sur la figure 9¹⁴:

- L'enfoncement a été bloqué dans le tronçon BC par la construction de seuils sous-fluviaux et l'injection de graviers;
- La réouverture du chenal ouest dans ce tronçon y a permis de diviser l'écoulement et de réduire les forces tractrices;
- Le décapage de surface d'une convexité à l'amont du tronçon DE a été réalisé et les matériaux ont été remontés à l'amont du tronçon AB, stockés et partiellement déversés dans le lit du Rhône.

Depuis cette date, sans que le secteur connaisse de crue remarquable, l'évolution a repris suivant la même logique. La CNR a réinjecté 10 000 m³ du stock sous le barrage de Motz et a entrepris de rétablir la continuité sédimentaire entre le confluent des Usses (dans la retenue de Seyssel) et le Vieux Rhône de Chautagne: 60 000 m³ ont été remis en mouvement en 2003-2004 et 60 000 m³ le seront en 2009, mais le temps de transit dans la retenue de Motz sera long et dépendra de l'importance des crues.

Cette évolution, relativement rapide à l'échelle historique, est représentative de la dynamique fluviale des vieux tronçons du Rhône court-circuités par les aménagements du haut Rhône. Des phénomènes semblables, quoique d'une intensité moins marquée, ont été enregistrés le long des Vieux Rhône de Belley et de Brégliez-Cordon. Ils sont encore plus sensibles dans l'aménagement de Miribel-Jonage (amont immédiat de Lyon) où l'impact d'un canal se fait sentir depuis le milieu du XX^e siècle¹⁵.

Le Rhône aval entre Beaucaire et l'embouchure

Le Rhône aval est soumis à des contraintes naturelles spécifiques: les apports des affluents cévenols et alpins méridionaux (Drôme, Ardèche, Aigues, Ouvèze, Durance et Gard) sont caractérisés par des crues rapides très chargées en sédiments caillouteux à sablo-limoneux. L'affaiblissement de la pente du lit et la proximité du niveau de base marin favorisent tendanciellement l'accumulation fluviale, qui se manifeste depuis plusieurs millénaires par l'édification du delta de Camargue et d'une très large plaine d'inondation entre Avignon et la mer¹⁶. A partir de la diffluence deltaïque, le fleuve se divise en deux bras, le Grand Rhône et le Petit Rhône, qui évacuent respectivement environ 90% et 10% des flux liquides (Fig. 10).

¹⁴ Peter C. KLINGEMAN, Jean-Paul BRAVARD, Yves GIULIANI, «Les impacts morphodynamiques sur un cours d'eau soumis à un aménagement hydroélectrique à dérivation: le Rhône en Chautagne (France)», dans *Revue de Géographie de Lyon*, 1 (1994), p. 75-89.

¹⁵ François PETIT, Danielle POINSART, Jean-Paul BRAVARD, «Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône river upstream of Lyon, France ("canal de Miribel")», dans *Catena*, 26 (1996), p. 209-226.

¹⁶ Hélène BRUNETON, *Evolution holocène d'un hydro-système méditerranéen et de son environnement géomorphologique. Les plaines d'Arles à l'interface entre le Massif des Alpilles et le Rhône*, Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille 1), 1999; Claude VELLA *et al.*, «Evolution of the Rhône delta plain in the Holocene», dans *Marine Geology*, 222 (2005), p. 235-265.

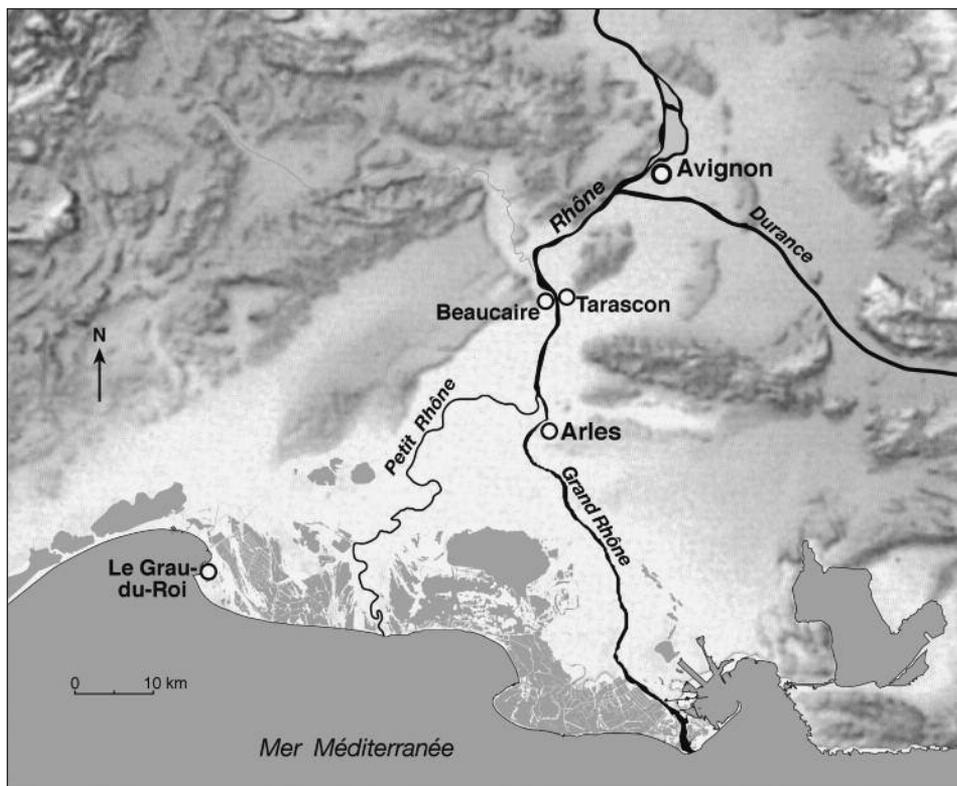


Fig. 10. Le Rhône aval et le delta, hydrographie et organisation spatiale.

En amont de la diffluence, le fleuve coule au sommet d'un large bourrelet alluvial, qui confère à la plaine une topographie «en toit», s'abaissant vers des marges externes marécageuses. Cette configuration, déjà en place à l'époque romaine, est renforcée à partir des XV-XVI^e siècles, avec l'apparition et la propagation vers l'aval du tressage fluvial¹⁷. Une large bande active, formée de bras divagant entre des îles sablo-caillouteuses instables, est décrite par les cartes anciennes à Avignon dès 1415. Elle recoupe le méandre médiéval de Vallabrègues, puis dépasse Beaucaire et atteint la plaine du Trébon en amont d'Arles au cours du XVII^e siècle, comme l'indique la carte de Cassini en 1775 (Fig. 11). Au Petit Age Glaciaire, le delta n'est pas atteint par l'avancée de la nappe de galets, mais les apports sableux, abondants et plus grossiers¹⁸, entraînent des désordres importants (Fig. 12): multiplication des bancs sableux mobiles, colmatage, défluviation et recouplement du méandre médiéval du Grand Passon en 1587, progradation rapide du lobe deltaïque du Bras de Fer (plus

¹⁷ PICHARD, *Espaces et Nature en Provence*.

¹⁸ Gilles ARNAUD-FASSETTA, Mireille PROVANSAL, «High frequency variations of water flux and sediment discharge during the Little Ice Age (AD 1586-1725) in the Rhone delta (France). Relationship to the catchment basin», dans *Hydrobiologia*, 410 (1999), p. 241-250.

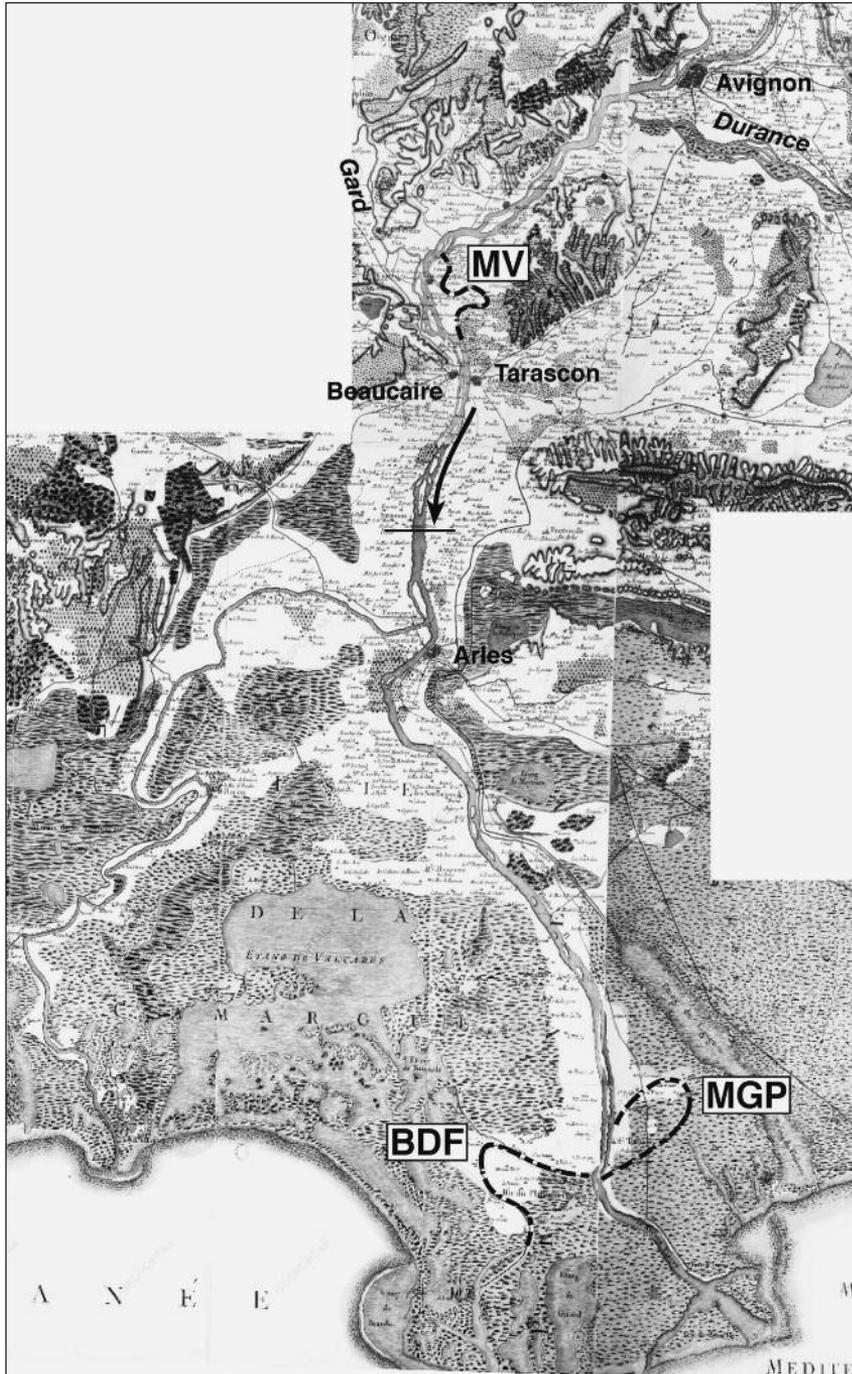


Fig. 11. Progression du tressage et méandres résiduels à la fin du XVIII^e siècle (d'après la carte de Cassini). MV, MGP: Méandres médiévaux de Vallabrègues et du Grand Passon; BDF: méandre du Bras de Fer (Petit Age Glaciaire).

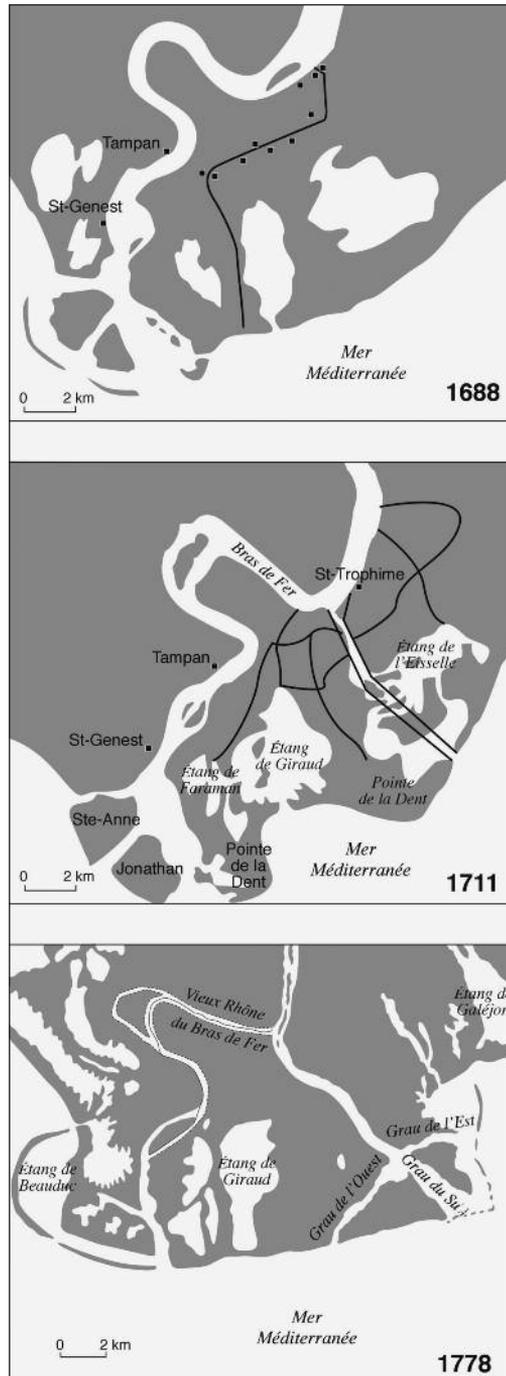


Fig. 12. Défluviations et modification des embouchures dans le delta du Rhône au cours du Petit Age Glaciaire. Les lignes noires représentées sur les cartes de 1688 et 1711 correspondent aux réseaux de canaux ou aux digues figurant sur les documents originaux.

de 80 m/an à la fin du XVII^e siècle), à son tour abandonné en 1711 au profit d'une nouvelle embouchure. Cette dernière avance de plus de 100 m/an au cours du XIX^e siècle¹⁹. Les défluviations successives et la progradation sur la mer ont abandonné des bourrelets sablo-limoneux, délimitant des zones basses marécageuses et des lobes deltaïques. Cet héritage contraint le tracé des bras historiques qui le recourent et conditionne encore la géométrie du champ d'inondation, ainsi que l'orientation des houles à la côte (Fig. 13).

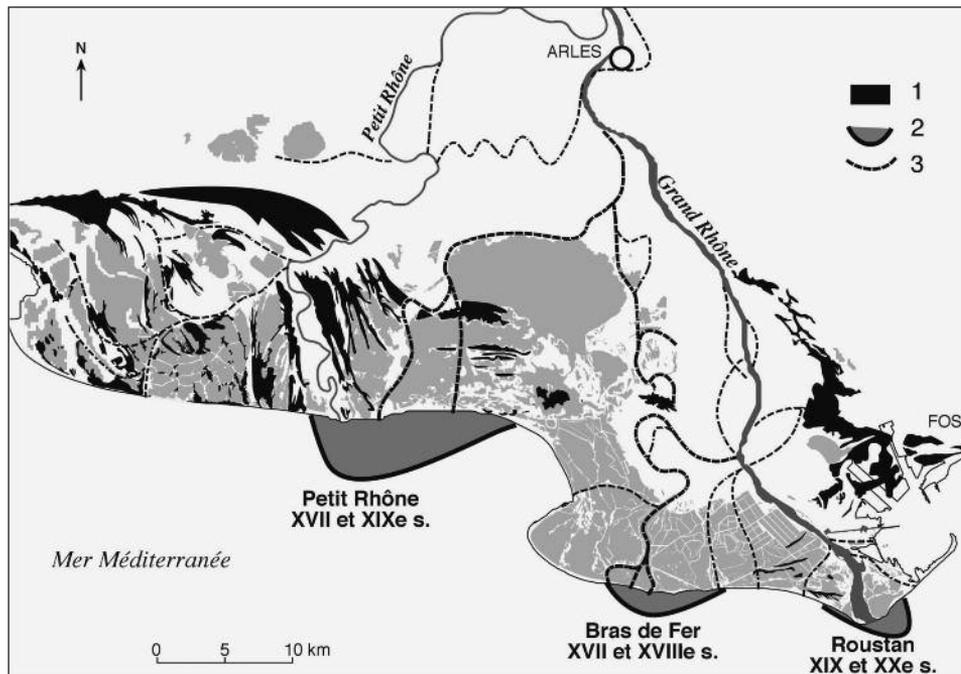


Fig. 13. Héritages morphologiques et sédimentaires dans le delta du Rhône.
1. Cordons littoraux, 2. Lobes deltaïques, 3. Bras fossiles.

L'intervention des ingénieurs à partir du milieu du XIX^e siècle est justifiée par la nécessité de la protection civile, après les crues catastrophiques des années 1840-1850, et par les besoins de la navigation. L'édification de digues «insubmersibles» est achevée en 1860-70, puis des ouvrages à courant libre (digues immergées, épis, «casiers») sont construits dans le chenal entre 1880 et 1930 (Fig. 14). La réponse du chenal est généralement très rapide, quoique variable en fonction des contraintes locales (pente d'énergie, substrat géologique): en quelques années, dès la fin du

¹⁹ Grégoire MAILLET, *Relations sédimentaires récentes et actuelles entre un fleuve et son delta en milieu microtidal: l'exemple de l'embouchure du Rhône*, Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille 1), 2005.

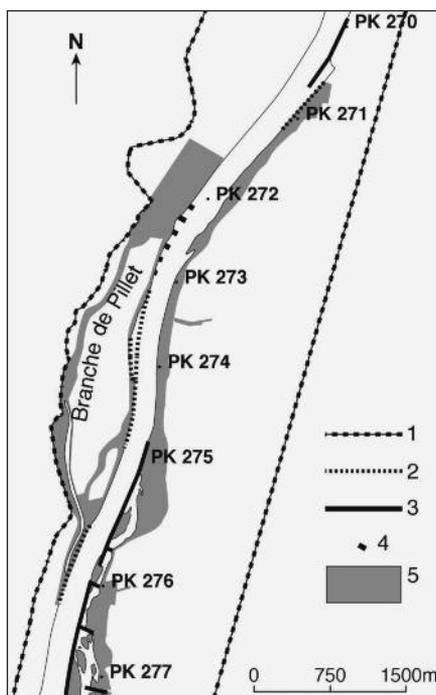


Fig. 14. Aménagements du chenal et développement de la ripisilve sur le tronçon Beaucaire-Arles au début du XX^e siècle. 1. Dignes non submersibles, 2. Dignes submersibles, 3. Casiers «Girardon», 4. Epis, 5. Ripisilve. PK = point kilométrique.

14 Mm³/an, le stockage dans les marges est négligeable (0,028 m³/an), compensé par un volume érodé/incisé de 0,16 m³/an; 2,72 m³/an sont temporairement stockés à l'embouchure dans le pro-delta, alors que le bilan du littoral (entre 0 et -20 m) est déficitaire. L'essentiel des apports sédimentaires (10 à 11 m³/an) est expulsé vers les fonds marins. Au début du XXI^e siècle, le Rhône aval semble donc se comporter désormais comme un «tuyau», dont les relations sédimentaires avec la plaine d'inondation et les berges ne sont effectives que lors des crues majeures.

XIX^e siècle, il se simplifie et s'approfondit à proximité des ouvrages²⁰. Depuis 150 ans, l'incision du plancher alluvial atteint jusqu'à 10 mètres par endroits entre Beaucaire et Arles (Fig. 15), 4 mètres en moyenne entre Arles et la mer. Le remblaiement des marges alluviales est plus lent et très inégal: les bras secondaires, barrés, sont atterris par plusieurs mètres d'accumulation fine; les casiers évoluent différemment, en fonction de leur taille et de leur position²¹; globalement la bande active est considérablement réduite.

La construction du barrage de Vallabrègues, mis en service en 1970, joue un rôle modeste et localisé spatialement, mais le vaste «escalier» hydro-électrique du bassin du Rhône et la réduction considérable des apports solides ont accéléré la transformation de l'hydrosystème dans la seconde partie du XX^e siècle par la réduction de la largeur et la poursuite de l'approfondissement du chenal, la stabilisation de l'embouchure et le déficit sédimentaire du littoral²². Grégoire Maillet *et al.*²³ ont présenté un bilan de cette évolution de Beaucaire à la mer, entre 1876/1895 et 2003, en termes de volumes sédimentaires: à cette échelle, et pour un volume entrant moyenné de 11 à

²⁰ Gilles ARNAUD-FASSETTA, «River channel changes in the Rhône Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management», dans *Catena*, 51 (2003), p. 141-172; MAILLET, *Relations sédimentaires récentes et actuelles entre un fleuve et son delta*.

²¹ Guillaume RACCASI, *Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval, recherches en vue de la restauration hydraulique et de la gestion des crues*, Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille 1), 2008.

²² ANTONELLI, *Flux sédimentaires et morphogénèse récente*; ARNAUD-FASSETTA, «River channel changes»; Christelle ANTONELLI, Mireille PROVANSAL, Claude VELLA, «Recent morphological changes of a channel in a deltaic environment. The case of the Rhône River, France», dans *Geomorphology*, 57 (2004), p. 385-402.

²³ MAILLET *et al.*, «Transferts sédimentaires dans le bas Rhône».

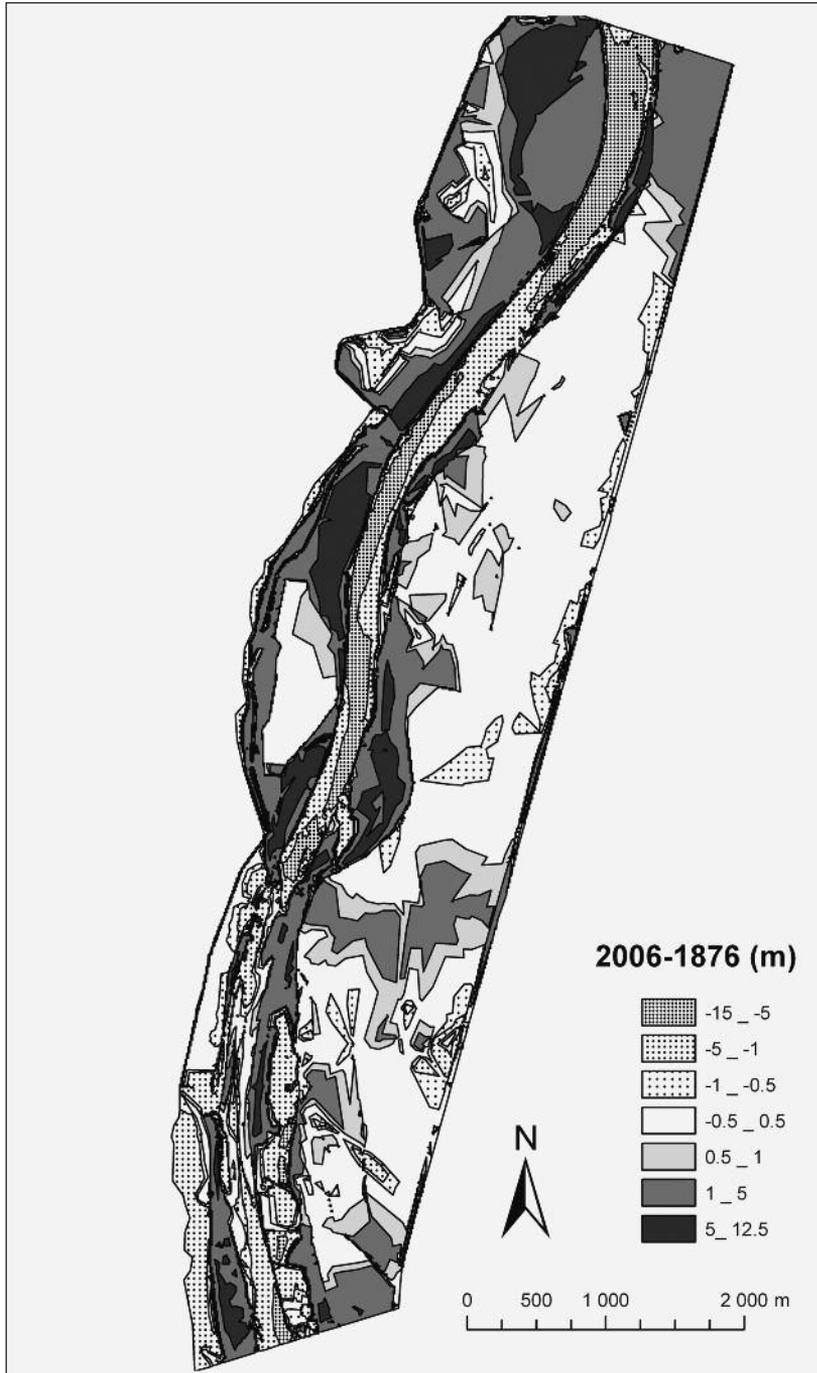


Fig. 15. Evolution de la bande active entre Beaucaire et Arles, 1876-2006 (d'après RACCASI, *Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval*, modifié). Valeurs de l'érosion (chenal) et de l'accumulation (marges et plaine), en mètres, entre 1876 et 2006.

Celles-ci contribuent à l'élévation des levées de berges, qui piègent les matières en suspension, accélérant ainsi la déconnexion topographique et sédimentaire avec la plaine d'inondation. Cette déconnexion est un des facteurs d'explication de l'évolution actuelle des forêts rivulaires vers des boisements dégradés, à proportion croissante de bois durs. L'importance du transfert direct de la charge solide jusqu'à la mer contraste avec la tendance à l'accumulation sédimentaire qui a caractérisé la plaine d'Arles et le delta au cours des siècles précédents.

Paléo-environnement de la plaine alluviale, aléa hydrologique et vulnérabilité du lit majeur

La dernière décennie a été caractérisée, sur le Rhône moyen et aval, par la recrudescence de fortes crues (1993 et 1994, 2002 et 2003), qui ont montré la vulnérabilité du lit majeur. L'urbanisation et les activités industrielles s'y sont en effet développées de façon importante depuis 50 ans. Un des objectifs du Plan Rhône, adopté en 2006, est de «concilier la prévention des inondations et les pressions d'un développement urbain et des activités humaines en zone inondable». Les enjeux et les modalités nouvelles du risque d'inondation ont fait l'objet d'une réflexion collective (collectivités publiques, associations de riverains, scientifiques), qui a servi de base à l'élaboration du Plan. Ce dernier décline en six volets une politique gestionnaire qui porte en particulier sur le risque d'inondation et la gestion des marges alluviales. Nous développons ici deux des aspects scientifiques du Plan Rhône, la réalisation d'un atlas des paléo-environnements et l'aide à la gestion des marges du Rhône.

L'atlas des paléo-environnements de la plaine alluviale du Rhône

Le lit majeur du Rhône n'est pas une surface alluviale homogène: les héritages morphologiques liés aux métamorphoses successives du fleuve au cours de l'Holocène ont créé des topographies complexes qui commandent la propagation et la hauteur du flux d'inondation. Sur la base de ce constat partagé entre les scientifiques de la ZABR et d'ORME, une cartographie des zones inondables a été réalisée à la demande de la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN), en particulier de la DIREN de bassin, qui est chargée de la mise en œuvre du Plan Rhône. Cette dernière a engagé la réalisation d'un atlas des zones inondables de la frontière suisse à la mer. La méthodologie retenue enrichit et affine la méthode «hydro-géomorphologique» préconisée par le Ministère de l'Environnement en prenant en compte les traces de l'évolution morphodynamique du système fluvial sur la longue durée, telles qu'elles sont visibles vers 1860, période charnière dans l'aménagement du fleuve²⁴. Le document de base est un excellent atlas des Ponts et Chaussées levé à l'échelle 1:10 000 entre Pyrimont (aval des gorges de Génissiat) et la mer.

²⁴ BRAVARD *et al.*, «Un atlas du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône».

La conception de la légende de l'atlas repose sur le concept de métamorphose fluviale²⁵ qui a été largement utilisé pour la compréhension de secteurs de la plaine alluviale du Rhône depuis 25 ans, mais la synthèse restait à faire à l'échelle de l'ensemble du cours français du fleuve. Schématiquement, deux styles fluviaux se sont succédé dans la période holocène: d'une part les méandres, qui traduisent l'ajustement du chenal à des flux d'eau capables d'évacuer une charge de fond peu abondante, et d'autre part le tressage, un style qui traduit l'incapacité du système fluvial à évacuer une charge trop abondante pour les débits de crue, même si ces derniers ont une forte compétence. Tout est question d'équilibre ou de déséquilibre entre les flux qui sont des «variables de contrôle» du système. De manière simplifiée, les périodes de méandration correspondent à des périodes multi-séculaires d'érosion limitée, de faible couplage entre les versants et les lits fluviaux, en d'autres termes de calme hydro-climatique; les périodes de tressage sont quant à elles plutôt rattachées à des périodes de crise hydro-climatique, de forte érosion et de couplage actif entre versants et lits fluviaux. Des premières subsistent des formes de convexité construites par la migration du chenal et des paléo-chenaux recoupés; des secondes, des secteurs de «bandes» de tressage abandonnées par la migration de la «bande active». A l'échelle des trois derniers millénaires, les principales périodes hydro-morphologiques ont été les suivantes:

- 2800-2400 BP²⁶: crise du Premier Age du fer et tressage généralisé, en particulier sur le Rhône amont et moyen;
- 2400-600 BP: calme hydro-climatique et dynamique de méandration;
- 1400-1860 ap. J.-C.: crise hydro-climatique du PAG (Petit Age Glaciaire).

Il existe des modulations de ce fonctionnement à des échelles de temps emboîtées (par exemple aux deux premiers siècles, ou vers les V^e-VIII^e siècle de notre ère, mais leur réalité est difficile à cerner sur un grand fleuve comme le Rhône. Enfin, la crise du PAG, très bien exprimée dans les Alpes et jusque sur le Rhône aval et le delta, a oblitéré une grande partie des formes antérieures de la plaine alluviale du Rhône, du moins à l'aval des principaux affluents. De l'ensemble de ce dispositif qui a fonctionné dans l'espace et dans le temps subsistent des traces; celles-ci forment une mosaïque qui a été plus ou moins bien datée selon les lieux, grâce aux apports de l'archéologie, du radiocarbone, de la cartographie historique à grande échelle et des textes. L'ensemble de ces informations cartographiées à 1:25 000 a été intégré dans un Système d'Information Géographique (SIG) évolutif²⁷. Les cartes sont destinées à servir de support à l'analyse de l'aléa à la fin du XIX^e siècle; elles seront complétées par la cartographie des dispositifs de protection récents et par celle de la vulnérabilité liée à l'occupation de la plaine alluviale. Nous en présentons un exemple ci-dessous.

²⁵ Leszek STARKEL, «The reflection of hydrologic changes in the fluvial environment of the temperate zone during the last 15000 years», dans K. J. GREGORY (éd.), *Background to Palaeohydrology: a perspective*, Chichester, 1983, p. 213-235.

²⁶ BP signifie Before Present, le présent étant fixé par convention à 1950 après J.-C.

²⁷ Notons que cette approche a également été utilisée pour la cartographie de diverses portions du Rhône suisse dans le cadre du mémoire de master de Laetitia LAIGRE, *Etude diachronique de la dynamique fluviale sur le Rhône suisse depuis la fin du Petit Age Glaciaire. Cartographie paléoenvironnementale sectorielle de la source au Lac Léman*, Mémoire de master 2, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, 2009

Vulnérabilité et gestion de l'endiguement sur le Rhône aval

En aval d'Avignon, la plaine alluviale est caractérisée par une topographie générale «en toit», dans laquelle la bande active héritée du PAG domine de plusieurs mètres les terres cultivées et habitées, qui doivent ainsi être traditionnellement drainées. L'endiguement, réalisé en 1860, sépare la plaine distale et les «ségonnaux»²⁸, proches du fleuve, qui forment une «néo-plaine d'inondation» désormais seule submergée lors des crues. La digue n'a pas subi de rupture jusqu'à la crue de décembre 2003, à l'exception du bras secondaire très méandriforme du Petit Rhône, sur lequel des brèches sont apparues en 1993-94. En fonction des choix d'implantation de la digue, deux types de situation se présentent. Dans le cas de «ségonnaux» étroits (< 300 m de large), comme le long des deux bras deltaïques, l'alluvionnement peut atteindre une épaisseur de quelques mètres depuis 140 ans; mais l'enfoncement séculaire du chenal déstabilise localement le pied de digue, s'il est trop près de la berge, induisant l'apparition de désordres géotechniques, voire de brèches. Ce fut particulièrement le cas dans la traversée de la ville d'Arles lors de la crue de décembre 2003 (11 500 m³/s à Beaucaire, Q₁₀₅ ans), qui a nécessité des travaux de confortement en urgence. Dans le cas de «ségonnaux» larges, comme entre Avignon et Arles (> 1 km), une reconstitution diachronique entre 1876 et 2007 montre que ce sont les marges alluviales proches qui piègent l'essentiel du flux solide débordant, au sein d'une ripisylve rendue très dense par l'embroussaillage²⁹. Au-delà, l'élévation du sol est très modeste (quelques centimètres, soit dans la marge d'erreur de l'interpolation; Fig. 15). Quelques formes en creux héritées font exception, comme celle du méandre médiéval de Vallabrègues, dans lequel le colmatage atteint 70 cm d'épaisseur depuis 1876 et régularise complètement la topographie initiale.

En amont de Beaucaire, l'aménagement CNR a renforcé la protection de la plaine alluviale, puisque le couronnement de la digue ne peut être surmonté que par les crues exceptionnelles (> Q₁₀₀₀). Des déversoirs reliés à des Zones d'Expansion des Crues (ZEC) permettent d'écarter et d'étaler dans le temps la propagation des forts débits. La plaine de Vallabrègues offre ainsi un volume de stockage de 38.10⁶ m³ mis en eau à partir de Q₁₀. Mais l'expérience de la crue de 2003 a mis en exergue deux problèmes, pris en compte actuellement par le Plan Rhône: le risque majeur lié aux ruptures brutales de digues, qui peuvent entraîner des pertes en vies humaines, et l'impossibilité d'écouler plus de 11 000 m³/s dans le «goulet» de la ville d'Arles. Dans cette ville, les changements d'occupation des sols, en particulier l'extension des quartiers périphériques urbains ou industriels, ont considérablement accru la vulnérabilité du lit majeur et posé de façon aiguë la question du risque lors des grandes crues de 1993-94 et 2003. L'incision naturelle du chenal depuis un

²⁸ Le terme «ségonnal» (pluriel «ségonnaux») – employé dans la partie aval du fleuve – désigne l'espace séparant le chenal vif, ou lit mineur, des digues de protection contre les inondations. Les ségonnaux peuvent atteindre quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres de large. Ces terrains proches du Rhône, alluvionnés par les crues, ont été conquis par les riverains.

²⁹ RACCASI, *Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval*.

³⁰ Capacité d'évacuation des débits, fonction de la section.

siècle a accru sa débitance³⁰ et abaissé les lignes d'eau en crue³¹, mais du même coup, elle a provoqué le soutirage et la déstabilisation des digues urbaines.

Pour réduire le risque de rupture de digues, les gestionnaires ont développé la notion de «digues résistantes», soit aux renards hydrauliques, soit à la surverse. Les premiers ont nécessité des études sur les effets néfastes de l'enracinement et des travaux de confortement; pour la seconde, les études portent sur la hauteur, la structure interne et la distance des ouvrages. Sur la base des connaissances acquises concernant le fonctionnement géomorphologique des lits, le «décorsetage» des méandres du Petit Rhône (écartement des digues) et la régularisation du tracé des digues en rive droite du Rhône aval sont ainsi en cours d'étude dans le cadre du Plan Rhône, sous maîtrise d'ouvrage du SYMADREM³². Enfin, le renforcement de la protection de la ville d'Arles et de ses quartiers périurbains passe par l'optimisation des ZEC situées en amont, dont certaines pourraient être mieux mobilisées. Mais une telle démarche implique l'accord des riverains, donc de longues négociations encore inachevées.

Ces deux études de cas montrent donc que le fleuve est devenu un système technique capable de produire ses propres formes de réajustement à l'échelle de tronçons aménagés depuis 150 ans environ pour les besoins de la navigation et de la production hydroélectrique. Ces réajustements (qui sont des impacts) interfèrent de manière complexe avec les effets hydro-sédimentaires de la sortie du Petit Age Glaciaire qui fonctionnent à l'échelle des affluents et de la vallée. De manière assez générale, les manifestations sédimentaires vont dans le sens du tarissement de la charge de fond et d'une importante sédimentation fine sur les «marges» fluviales, qui sont les reliques de la bande de tressage du PAG.

Les politiques de réhabilitation des marges alluviales

L'amélioration de la débitance et l'abaissement des lignes d'eau lors des crues passent par la réactivation de la dynamique fluviale sur les marges alluviales. Cet objectif est énoncé en particulier dans le Plan Rhône. Il est associé à la perspective de réhabilitation du fleuve et de son écosystème forestier, ainsi qu'au rétablissement du continuum fluvial et de l'alimentation sédimentaire du littoral. Il suppose l'éventuelle suppression ou réouverture des ouvrages édifiés au cours des 150 dernières années, qui ont eu un impact majeur sur les mutations du style fluvial. A l'initiative de la CNR, des études ont été engagées³³ sur plusieurs sites (Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon, Bourg-lès-Valence, Montélimar, Pont-Saint-Esprit et deux bras morts sur le bas Rhône) et des opérations de réhabilitation des marges alluviales sont en cours à Pont-Saint-Esprit, sur le Vieux Rhône de Donzère-Mondragon, sur le bras mort du Pillet (2009) et sur le Vieux Rhône de Montélimar

³¹ Christelle ANTONELLI *et al.*, «Analyse de l'évolution séculaire du lit du Rhône à Arles à partir de l'analyse d'image. Implications géomorphologiques et paléo-hydrologiques, dans *Méditerranée*, 1-2 (2004), p. 135-142.

³² SYMADREM: Syndicat Mixte des Digues du Rhône et de la Mer, Arles.

³³ Carolyne VASSAS, Anne CITTERIO, *Accompagnement scientifique pour la mise en place d'un observatoire pour la gestion des sédiments du Rhône, étude préliminaire*. Document CNR, Lyon, 2006.

(2010). Les premiers bilans sédimentaires montrent l'hétérogénéité spatiale des stockages, qui justifie la poursuite des recherches actuelles.

Les études réalisées par les chercheurs des universités Lyon 2 et Aix-Marseille 1 en collaboration avec l'IRSN³⁴ reposent sur une démarche commune: l'évaluation et la caractérisation des volumes stockés, suivies du calcul des dynamiques nécessaires à leur remise en suspension et de l'élaboration d'un bilan écologique. L'évaluation des volumes est réalisée par traitement d'images topo-bathymétriques diachroniques au moyen d'un SIG³⁵. Sur cette base, des carottages sédimentaires ou des prélèvements sont ensuite effectués dans des coupes naturelles, en fonction de la caractérisation dynamique de milieux types (bras ou îlots anciens, berges, casiers). La chronologie des dépôts peut être établie par le croisement de plusieurs indicateurs (isotopes du ²¹⁰Pb et du ¹³⁷Cs, dendrochronologie, corrélations débit-hauteur d'eau (QdH³⁶) entre les crues connues et l'altitude des dépôts, comptage des séquences de crues), puis étendue à l'échelle de tronçons homogènes. Des analyses granulométriques permettent ensuite de mettre en œuvre les formules usuelles de calcul des forces tractrices et du transport. Les possibilités de déstockage sont cependant suspendues à la présence éventuelle de contaminants (métaux lourds, radionucléides, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), pesticides, polychlorobiphényles (PCB), etc.), dont la teneur doit être précisément évaluée. La remise en suspension et le transport des pollutions concernent les apports à la Méditerranée et les épandages sédimentaires dans la plaine, associés aux brèches lors des crues, ainsi que les risques pour la santé humaine, comme pour celle des systèmes biologiques. La Directive cadre européenne sur l'eau (DCE) fait référence de manière plus globale à l'état chimique et écologique des masses d'eau. La pollution des sédiments des marges peut ainsi avoir un caractère prohibitif en termes de coûts par rapport aux projets de réactivation de la dynamique fluviale sur les marges alluviales. Il n'est pas exclu que certains tronçons présentent des concentrations en substances polluantes qui rendraient le réélargissement impossible avec le niveau de précaution actuel.

Les sites expérimentaux étudiés correspondent soit aux «Vieux Rhône» recoupés par l'aménagement hydro-électrique, soit à d'anciens bras secondaires artificiellement barrés («lônes») afin de concentrer l'écoulement dans le chenal principal.

Le projet de réactivation des Vieux Rhône de Montélimar

La réactivation en cours du Vieux Rhône de Donzère-Mondragon a fait l'objet d'une étude-pilote qui reprend la méthode élaborée sur le Vieux Rhône de Montélimar ; cette méthode a aussi été appliquée sur les Vieux Rhône de Bourg-lès-Valence et Péage-de-Roussillon, où des projets avancés existent³⁷. Le principe de base est de

³⁴ IRSN: Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, Cadarache.

³⁵ RACCASI, *Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval*.

³⁶ Les courbes QdH, ou courbes de tarage, reposent sur la relation vérifiée entre débits et hauteurs d'eau sur une section de mesure.

³⁷ Guy COLLILIEUX, Francis FRUCHART, Jean-Paul BRAVARD, «Réactivation de la dynamique fluviale sur les marges du Rhône», dans *Transports solides et gestion des sédiments en milieux naturels et urbains*, Colloque SHF, Lyon, 28-29 novembre 2007, p. 187-194.

construire un SIG représentant l'évolution des milieux en eau et de l'occupation du sol vers 1860, en 1954-1955 et en 2003-2004, ainsi que les aménagements hydrauliques superposés depuis le milieu du XIX^e siècle, voire plus tôt. L'évaluation de l'épaisseur des sédiments fins déposés sur les marges a été réalisée selon des transects (profils extraits d'archives et levés de terrain). Enfin, et c'est le point original, il a été proposé de délimiter des «casiers» dont la typologie est basée sur leur aptitude, à chacune des époques, à stocker les sédiments fins. La validité de la mosaïque ainsi produite peut être testée à l'aide d'une modélisation hydraulique en 2D qui donne les vitesses et les hauteurs d'eau. Le principe est que les casiers «ouverts» aux flux mais protégés par des digues basses stockent les volumes de sédiments les plus importants; inversement, ces casiers sont en principe les plus à même de déstocker les dépôts si les digues basses sont arasées, une fois la végétation arborée supprimée; ils seront destinés à accueillir les premières opérations de réactivation. Chaque site présélectionné a fait l'objet de mesures hydrauliques (forces tractrices) permettant de connaître la capacité d'auto-curage pour différents débits, le principe étant d'utiliser l'énergie du Rhône en crue. Les mesures de concentration en métaux lourds ont montré que le départ des matériaux est compatible avec la réglementation européenne en la matière, mais le durcissement de la réglementation sur les PCB, consécutif à l'état des lieux réalisé en 2007, a imposé des analyses complémentaires qui ont retardé le projet.

Les premiers travaux ont cependant été réalisés sur le Rhône aval; ils concernent la réactivation d'un bras latéral pour laquelle le principe de la réactivation de la dynamique fluviale a été retenu, comme la CNR le prévoit depuis 2003 sur l'ensemble du fleuve.

La tentative de réactivation de la lône du Pillet (Rhône aval)

La lône du Pillet, en rive droite du Rhône (PK³⁸ 272 à 276), est longue de 3.7 km et large de 310 à 530 m. Connectée de façon permanente au chenal principal par l'aval, elle se reconnecte par l'amont à partir d'un débit de 2500 m³/s (soit environ cinquante jours par an). Par faible débit, des poches d'eau pérennes persistent, alimentées probablement par la proximité de la nappe alluviale. Sa réouverture par la CNR, depuis l'été 2008, s'inscrit dans le volet «Réhabilitation écologique» du Plan Rhône et vise également à augmenter la débitance du chenal en amont du site d'Arles³⁹. Les travaux réalisés sont associés à une étude historique et sédimentologique de l'espace concerné. En 1870, cette lône correspondait à un des bras du Rhône tressé: la bande active était large de plus d'un kilomètre, avec une bathymétrie irrégulière et peu profonde (entre -1 et -10 m), des bancs mobiles et des îlots couverts de végétation basse. Entre 1870 et 1876, le bras du Pillet fut isolé par une digue longitudinale submersible, associée à plusieurs seuils semi-perméables.

³⁸ PK: points kilométriques mesurés sur le chenal du Rhône à partir d'un point d'origine situé sur le Pont de la Mulatière à Lyon.

³⁹ Simon DUFOUR, Mireille PROVANSAL, Guillaume RACCASI, «Can risk management restore ecogeomorphological functioning of fluvial margins along the lower Rhône River (France, SE)?», dans B. GUMIERO, M. RINALDI and B. FOKKIENS (ed.), *IVth ECRR Conference on River Restoration*, Venice, 2008, p. 349-356.

Puis, dans les années 1980-90, le chenal principal fut équipé de «casiers Girardon» sur ses deux berges. Ces aménagements induisirent d'une part le remblaiement partiel de la lône, d'autre part une incision de plusieurs mètres du plancher du chenal principal, ce qui accentua la déconnexion entre les deux espaces (Fig. 16).

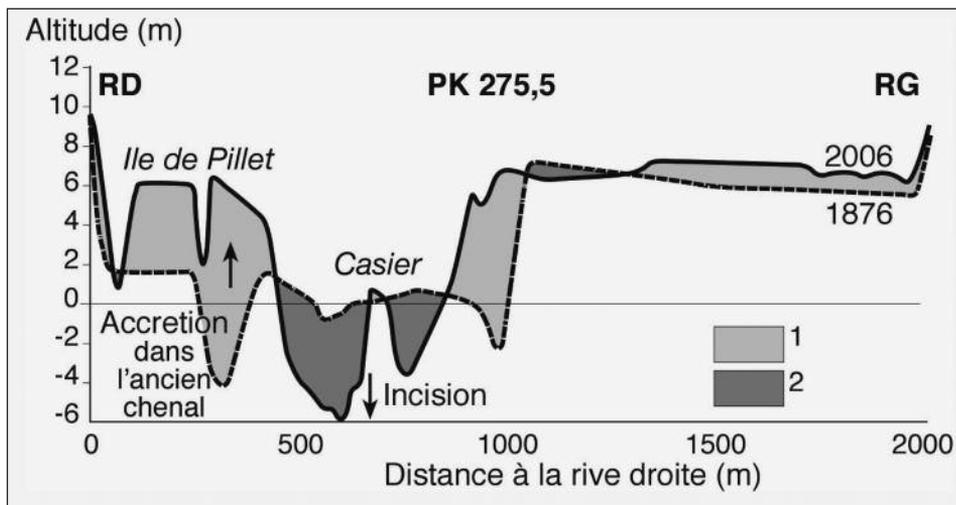


Fig. 16. Coupe topo-bathymétrique transversale du chenal du Rhône au niveau de la lône du Pillet. 1. Accumulation, 2. Erosion.

L'étude diachronique (1876-2006) montre que les deux entrées amont du bras du Pillet ont été remblayées en quelques années⁴⁰. Au cours du XX^e siècle, la surface en eau du bras a diminué de 70% (1.8 millions de m²), avec une accélération sensible après 1950. En 1876, la végétation rivulaire était majoritairement une oseraie, avec de rares boisements arborés sur l'île. Actuellement, la ripisilve forme une forêt-galerie dense, déjà ancienne, à *Salix alba* et *Populus alba*, large de 100 à 150 m, installée sur les marges atterries du bras; des espèces pionnières se développent à l'entrée du bras. Les connexions amont, situées dans les concavités des sinuosités du fleuve, ont cependant été le siège d'une dynamique active, caractérisée par l'alternance d'érosion et de dépôts: deux générations d'épis, édifiés en 1905 puis 1960 pour protéger la berge, ont été déconnectées et détruites de manière naturelle. La réouverture volontaire du bras s'inscrit donc logiquement dans une tendance naturelle du fleuve à s'écouler dans cette direction.

Plusieurs carottages sédimentaires réalisés dans la lône, la stratigraphie de la berge visible à l'entrée et des sondages montrent que le remblai alluvial récent repose sur les galets de la bande de tressage du XIX^e siècle (Fig. 17). L'accumulation présente une épaisseur et une granulométrie décroissantes vers l'aval: environ 5 à 7 mètres de sables et limons aux connexions amont, dont le tiers provient des crues

⁴⁰ RACCASI, *Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval*.

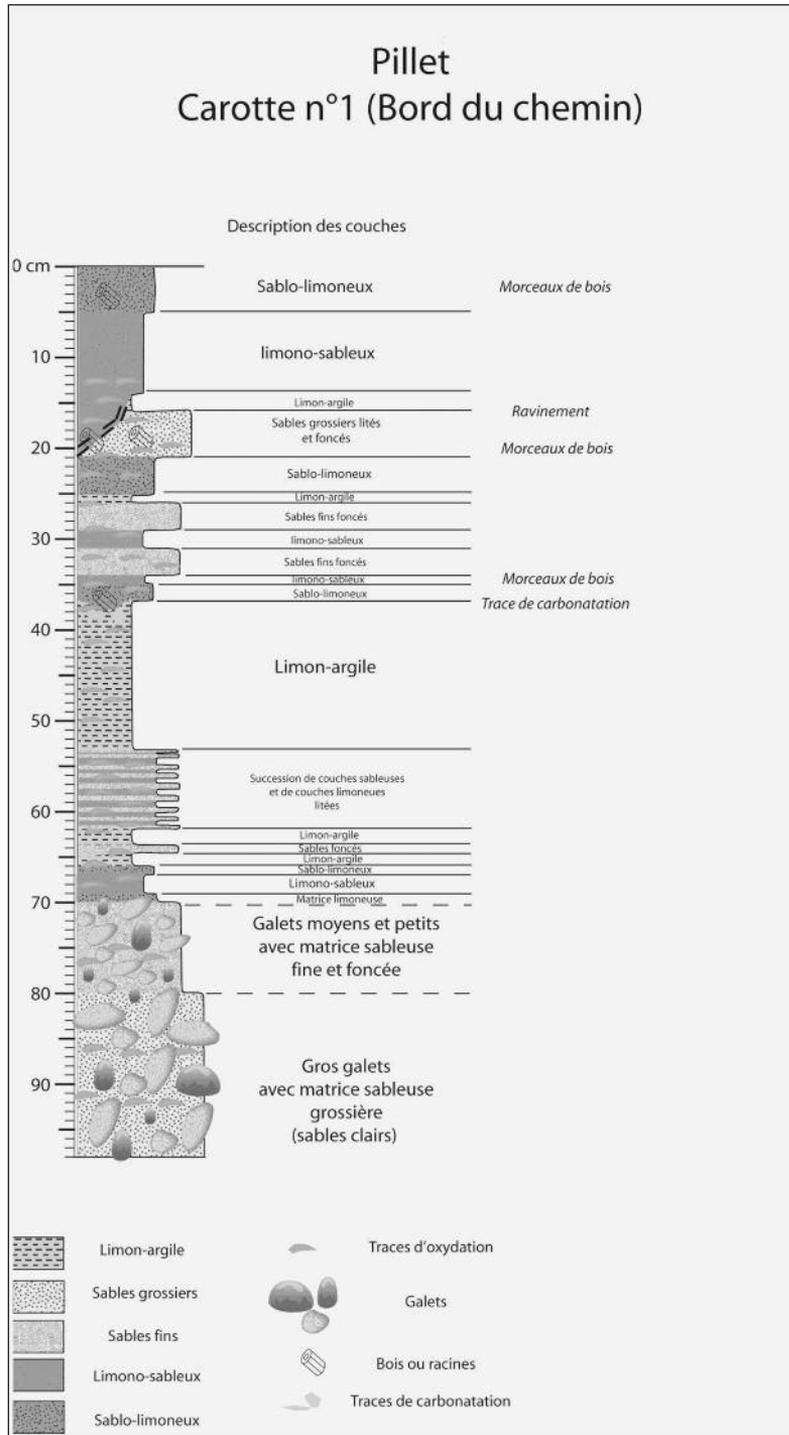


Fig. 17. Stratigraphie du colmatage de la lône du Pillet.

des années 1993 à 2003⁴¹; 1.5 à 0.7 m de limons et sables fins dans la partie amont de la lône, avec des épaissemments à proximité des anciens ouvrages transversaux. Ces dépôts sont inégalement cohésifs (les sables fins forment plus de 50% de leur partie supérieure, alors que les limons sableux sont plus importants en profondeur): leur sensibilité à un remaniement hydraulique doit donc être analysée en détail. L'ouverture de la lône du Pillet pour sa réactivation hydraulique a été réalisée en deux étapes: le déboisement total de l'espace correspondant à l'ancien chenal durant l'été 2007 a permis de mettre au jour les anciens seuils semi-perméables et de réduire la rugosité hydrodynamique potentielle. L'ouverture mécanique d'une des connexions amont et la rupture des anciens ouvrages qui la barraient (digue submersible et seuils), en juillet 2008, a réintroduit un courant vif permanent dans le bras. Mais les crues de l'hiver 2008-2009 (jusqu'à 7000 m³/s) n'ont apparemment pas joué le rôle attendu: les talus sablo-limoneux artificiels, trop méandriformes, du nouveau chenal ont subi des effondrements, qui freinent presque totalement la circulation de l'eau. Il apparaît donc indispensable d'élargir et de protéger l'entrée du bras, y compris avec des enrochements. Par ailleurs, l'analyse de la berge proche de la connexion par les chercheurs de l'IRSN a révélé une teneur importante (jusqu'à 80 Bq kg/sec) en éléments radio-actifs (¹³⁷Cs et ¹⁰Am), hérités des rejets de l'usine nucléaire de Marcoule jusqu'en 1995⁴²: cette découverte soulève le problème des risques associés à la remise en suspension de sédiments pollués, qui nécessite une étude approfondie avant de poursuivre la politique de déstockage sédimentaire du bras.

Ces projets de réactivation de la dynamique fluviale et de déstockage sédimentaire sont rendus nécessaires par la confirmation récente de l'aggravation des niveaux de crue pour des débits de fréquence donnée. Ils sont à l'agenda du Plan Rhône depuis 2006 et complètent le Plan décennal de réhabilitation hydraulique et écologique du Rhône financé depuis 1995, en donnant plus d'ampleur spatiale au projet de réhabilitation et en introduisant le principe d'utiliser l'énergie du fleuve plutôt que l'énergie fossile. Le succès de ces opérations sera conditionné par la volonté de passer des tests (en cours) à une véritable politique de réélargissement des Vieux Rhône et le rythme dépendra aussi de l'hydrologie future du fleuve. Dans cette perspective, un Schéma directeur des opérations de réélargissement du Rhône est en préparation au sein d'un nouvel Observatoire des Sédiments du Rhône soutenu par la CNR, l'Agence de l'eau, la DIREN et les régions Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon.

Conclusion générale

Le Rhône entre la Suisse et la mer est le fleuve «fougueux», «indomptable», puis «domestiqué» qui tient une place si importante dans l'imaginaire français. Les travaux réalisés depuis une trentaine d'années tant en géographie historique qu'en morphodynamique fluviale conduisent à nuancer cette vision des choses. En pre-

⁴¹ PROVANSAL *et al.*, «High-resolution evaluation of recent bank accretion rate».

⁴² PROVANSAL *et al.*, «High-resolution evaluation of recent bank accretion rate».

mier lieu, comme les autres grands cours d'eau européens issus de massifs montagneux, le Rhône a connu plusieurs métamorphoses de son style fluvial, une succession de modes de fonctionnement et de paysages fluviaux et riverains. L'imagerie contemporaine repose sur l'extrapolation abusive au passé d'un modèle moderne totalement dépendant des conditions environnementales du Petit Age Glaciaire. Domestiqué, dompté pour les besoins de la société contemporaine, le Rhône est cependant demeuré un organisme doté d'une puissante dynamique qui s'exprime sur le long terme de la société qui l'a maîtrisé. L'équilibre morphologique du fleuve et de ses marges est loin d'être atteint, mais on commence à bien comprendre les mécanismes en jeu et à dégager les tendances évolutives. Le passage à des opérations de restauration basées sur l'inversion (très partielle) de la dynamique en cours se concrétise. Cette politique du Rhône, probablement la plus marquante de la décennie en cours, motivée par les crues à répétition enregistrées depuis 1990, doit réussir car l'enjeu n'est plus seulement la valorisation des ressources fluviales mais aussi la capacité de la société de leur assurer un caractère durable.

Remerciements

Nous remercions D. Nadal (Université de Lyon 2) et P. Pentsch (Université d'Aix-Marseille 1) qui ont assuré la réalisation des figures qui illustrent cet article, ainsi que G. Raccasi et M. Monaco (Université d'Aix-Marseille 1) pour leurs recherches sur les lônes et la réalisation des figures 16 et 18. Les recherches sur le Rhône aval ont bénéficié d'un financement du CNRS dans le cadre de la ZA ORME, et de l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre de l'ANR *Extrema* (ANR-06-VULN-005).