Zeitschrift: Archives des sciences [2004-ff.]

Herausgeber: Société de Physique et d'histoire Naturelle de Genève

Band: 59 (2006)

Heft: 2-3

Artikel: Conséquences des aménagements sur la morphologie du Rhône à l'aval de Beaucaire

Autor: Raccasi, Guillaume / Provansal, Mireille

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-738326

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Conséquences des aménagements sur la morphologie du Rhône à l'aval de Beaucaire

Guillaume RACCASI[1], Mireille PROVANSAL[1]

Ms. reçu le 16 juin 2006, accepté le 17 juillet 2006

Abstract

Effects of catchments on the southern Rhone morphology downstream Beaucaire.

Since 1993, the damages caused by flood event on the Rhone between Beaucaire and mouth made become aware of politics the importance of sedimentary transit or storage on channel capacity to evacuate flow and flooding risk. The role of river engineering is one of the keys in this debate. Concerted constructions go up in the second part of the19th-century until the '80, the Rhone was continuously subjected to various catchments to protect populations, support navigation, and produce electricity. The diachronic study from old charts and aerial imageries integrated in Geographical Information System make it possible to determine space and temporal impacts of each construction type on the river system. Since the 150 last year, on the whole studied section, mobility of the system and times response were highlighted: (1) Main dikes block natural evolution of meandering channel, (2) Evolution braided channel to a single channel by installation of groyne, and the closing of secondary arms, (3) Linearization and contraction of the mean water channel caused by engineering practice. Specific role of the works in the global context of evolution in the catchments area is discussed.

Keyword: *Rhone, image analyze, fluvial development, morphological adjustement.*

Résumé

Depuis 1993, les dégâts causés par les crues du Rhône aval entre Beaucaire et l'embouchure ont fait prendre conscience aux collectivités de l'importance du transit ou du stockage des sédiments sur la capacité hydraulique du chenal et les risques d'inondation. Le rôle des aménagements du fleuve est une des clés de ce débat. Les premiers aménagements concertés remontent au milieu du XIXe siècle. Jusque dans les années 1980, le Rhône est continuellement soumis à divers travaux pour protéger les populations, favoriser la navigation, produire de l'électricité. L'étude diachronique de cartes anciennes et de photographies aériennes dans un Système d'Information Géographique permet de déterminer les impacts spatiaux et temporels de chaque type d'aménagement sur le fonctionnement du système fluvial. A l'échelle des 150 dernières années, sur l'ensemble du tronçon étudié, la mobilité du système et les temps de réponses sont mis en évidence: (1) Le blocage de l'évolution naturelle des méandres par des digues insubmersibles, (2) le passage d'un chenal en tresse à un chenal unique par des digues submersibles et la fermeture des bras secondaires, (3) la linéarisation et le rétrécissement de la bande active par les aménagements à courant libre. Le rôle spécifique des ouvrages dans le contexte global de l'évolution du bassin versant est discuté.

Mots clefs: *Rhône, traitements d'images, SIG, aménagements, ajustements morphologiques.*

Abréviations:

CNR: Compagnie Nationale du Rhône
SSR: Service Spécial du Rhône du corps des Ponts et Chaussées
SIG: Système d'Information Géographique
IGN: Institut Géographique National
P&C: Ponts et Chaussées
SYMADREM: Syndicat Mixte d'Aménagement des Digues du Rhône et de la Mer
IFN: Inventaire Forestier National

[1] *Centre Européen de recherche et d'Enseignement des Géosciences et de l'Environnement (UMR-6635) Aix-Marseille Université, BP 80, F-13545 Aix en Provence, France,* – raccasi@cerege.fr

Introduction

Le Bas Rhône (entre Beaucaire et la mer) est soumis à des contraintes naturelles spécifiques: les apports des affluents cévenols et alpins méridionaux (Fig. 1), caractérisés par des crues rapides très chargées en sédiments, l'affaiblissement de la pente du lit et la proximité du niveau de base marin y favorisent tendanciellement l'accumulation fluviale. Celle-ci se manifeste depuis plusieurs millénaires par l'édification du delta de Camargue et d'une très large plaine d'inondation entre Avignon et la mer (Bruneton 1999; Vella 1999). Ce comportement est encore illustré au cours de la «crise» environnementale du Petit Age Glaciaire (Pichard 1995 et 1999), pendant laquelle le lit du Rhône inférieur est caractérisé par un style «en tresse», avec un chenal peu profond, entre des levées alluviales très larges, aboutissant à une morphologie deltaïque digitée construite principalement par les apports fluviaux (Galloway 1975; Maillet 2005).

Fig. 1: Localisation des secteurs étudiés (© IGN PFAR 2000)

Ce territoire est néanmoins habité et mis en valeur depuis très longtemps, comme en témoignent les sites portuaires antiques d'Arles et d'Avignon et les cadastrations romaines de la plaine. Les sociétés anciennes se sont plus ou moins accommodées du risque d'inondation, même si elles ont cherché très tôt les moyens d'en limiter les impacts (Allinne, 2005). Mais il faut attendre le XIXe siècle, et les outils qu'offre la révolution technique et industrielle, pour que les riverains modifient réellement le milieu alluvial, dans le but de se protéger des crues, améliorer la navigation, puis au XXe siècle produire de l'énergie. Ces travaux ont des conséquences importantes sur le style fluvial, l'écoulement des crues et le transfert sédimentaire. Dans le même temps, les progrès de la cartographie, puis de la photographie aérienne, fournissent une documentation graphique, qui permet de mettre en relation la chronologie des aménagements et celle des transformations du fleuve. C'est l'objet de cet article.

Problématique

Les premières digues sont édifiées au début du XIXe siècle, sous la responsabilité de syndicats ou de collectivités riveraines. Mais ce sont les deux crues majeures de novembre 1840, puis de Mai 1856, estimées environ à 13 000 $m^3.s^{-1}$ et 12 000 $m^3.s^{-1}$ à Beaucaire (Pardé, 1925), qui déclenchent la création du Service Spécial du Rhône (SSR), chargé de la construction jusqu'à la mer de digues insubmersibles, achevées dans les années 1860.

Par ailleurs, l'apparition de la navigation à vapeur nécessite un aménagement du chenal, pour supprimer les bancs mobiles et abaisser les seuils, qui limitent le nombre de jours navigables et compliquent la navigation. A partir des années 1870 des aménagements à courant libre sont édifiés dans le chenal. Les ingénieurs du SSR (notamment Jacquet et Girardon) favorisent artificiellement le colmatage des bras secondaires (lônes) et mettent en place des «casiers» submersibles (épis parallèles aux berges, reliés à la berge par des épis perpendiculaires et submergés à partir du module), qui canalisent le Rhône dans un chenal unique. Ces travaux s'achèvent dans la première moitié du XXe siècle. Sur le Petit Rhône, bras secondaire du delta qui ne draine que 10% du débit fluvial (Ibanez et al. 1997), des déflecteurs hydrauliques sont installés entre 1976 et 1981, en relation avec la mise en activité d'un nouveau canal de navigation entre le Rhône et Sète. Lors des forts débits, ces aménagements concentrent le débit liquide vers l'intérieur du chenal provoquant une remise en mouvement de la charge de fond, tandis qu'ils favorisent la sédimentation latérale et son piégeage, dans les casiers et en arrière des panneaux.

Enfin, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) est créée par l'Etat en 1934 pour exécuter des travaux sur le fleuve de telle sorte «*que l'aménagement de la force hydraulique, l'établissement de la voie navigable et la construction des canaux primaires d'irrigation et des stations de pompage soient toujours menés parallèlement, dans les parties correspondantes du fleuve*» (décret du 5 juin 1934). Un immense escalier de barrages est édifié entre Genève et la mer, dont la «marche» aval est constituée par le barrage de Vallabègues, mis en eau en 1974. Chargée du maintien de la ligne d'eau, la CNR effectue des dragages localisés sur les secteurs d'accumulation persistante, comme le «palier» d'Arles, en amont immédiat de la diffluence entre les deux bras deltaïques.

Ces aménagements successifs ont modifié, volontairement ou non, les conditions d'écoulement des eaux et des sédiments. L'effet le plus sensible, à l'échelle des 150 dernières années, est la transformation radicale du style fluvial, passé du tressage encore présent en 1876 sur la carte dressée par les services des Ponts et Chaussées, au chenal actuel, unique, profond et faiblement sinueux. Mais au-delà de ce constat global, déjà analysé (Antonelli, 2002; Arnaud-Fassetta, 2003), il est nécessaire d'analyser les transformations spécifiques associées à chaque type d'ouvrage. Quelles sont la vitesse et l'ampleur de la réponse du milieu? Quelle est la vitesse de reconstitution du système sous l'impact des aménagements? Sur quelle extension spatiale par rapport à l'ouvrage?

Cet article propose quelques réponses à ces questions, à verser aux débats soulevés par les inondations des grandes crues de la dernière décennie (1993, 1994, 2002, 2003), qui ont amené les gestionnaires et l'opinion publique à remettre en cause le rôle de certains ouvrages. Il faut néanmoins souligner que ces réponses sont complexes, puisque l'effet des aménagements se combine, depuis 150 ans, avec celui des mutations de l'occupation des sols et des paysages dans le bassin versant, qui modifient également la circulation de l'eau et des sédiments (Piegay et al. 2004).

Matériel et méthodes

L'analyse des cartes anciennes et des photographies aériennes, leur intégration dans un Système d'Information Géographique (SIG), permet d'évaluer l'impact des ouvrages de génie fluvial sur la morphologie du Bas Rhône.

L'utilisation de cartes anciennes est complexe. Le Rhône inférieur a été abondamment cartographié depuis le début du XIXe siècle (Volcot 2001). Mais chaque carte

Tableau 1: Index des documents exploités. (Rh = Rhône; GR = Grand Rhône; PR = Petit Rhône)

Document	Date	Echelle	Secteur en Pk	Erreur (en m)
Amélioration du Rhône maritime au passage de Beaujeu	8 avril 1867 14 juillet 1868 22 mai 1869	1 / 10 000	293-297 GR	10 10 10
Atlas du Rhône du pont de Donzère à la mer	1870-1876 (levé entre:)	1 / 10 000	269-281 R & PR	5
Atlas du Rhône du pont de Donzère à la mer + surcharge bathymétrique et projet d'aménagment	1876-1877 (levé entre:)	1 / 10 000	269-281 R	5
Plan Branciard	1905	1 / 5 000	269-281 R	5
Nîmes n°8	1947	1 / 20 000	269-281 R & PR	3
Arles n°4	1949	1 / 20 000	269-281 R & PR	3
Plan Avant travaux	196X- 1983	1 / 1 000 1 / 2 000 1 / 5 000	269-281 R	<1 <1 <1
Carte IGN Scan25	1994	1 / 25 000	PR	<2.5
Photographies aériennes N&B (Davide et al.)	16/07/1979	1 / 25 000	PR	8
Orthophoto C (Davide et al.)	15/05/2003	50 cm / pixel	269-281 R	1

couvre des secteurs différents, parfois très localisés, et répond à des besoins spécifiques. La conservation des documents est de valeur inégale selon les archives, ils sont souvent incomplets (cartes extraites d'études, légende absente). La recherche de cartes correspondant à des secteurs et des dates clés constitue donc une grande partie des difficultés initiales.

Parmi les cartes antérieures aux premiers aménagements, les cartes de Cassini (rédigées vers 1775) présentent une bonne information qualitative sur le territoire, mais la projection, l'échelle (1/86400) et la qualité des levés topographiques comportent des marges d'erreur de 300 m en moyenne, trop importantes pour quantifier des évolutions (Pelletier, 2004). La première carte d'Etat-Major, au 1/80000, exploitée par Antonelli (Antonelli, 2002), est encore trop imprécise.

En fait, les premiers relevés cartographiques précis, orientés sur la problématique des aménagements, ont été réalisés après les grandes crues de 1840 et 1856, sur l'ensemble du linéaire rhodanien, ou, par phases, sur les différents secteurs à aménager (tableau 1). 5 documents, dressés entre 1867 et 1994 correspondent aux besoins de la recherche. A partir de 1962, ces cartes sont complétées par 2 campagnes de photographies aériennes (1979 et 2003).

L'information cartographique

Les cartes de travaux *d'Amélioration du Rhône maritime au passage de Beaujeu* (PK 295 du Grand Rhône, actuellement connu comme le «seuil de Terrin») ont été dessinées en 1867, 1868 puis 1869, en annexe du programme d'aménagement du même nom réalisé en 1867. A ce titre, et malgré leur faible couverture spatiale, elles permettent un «zoom» chronologique sur l'impact local immédiat d'un type d'aménagement.

L'*Atlas du Rhône, du Pont de Donzère à la mer* des Ponts et Chaussées, réalisé au 1/10000 par le SRR sur l'ensemble du linéaire entre 1870 et 1876, donne le premier état en 3D de la géométrie du lit peu de temps après l'endiguement insubmersible. Il fournit un temps T_0, qui permettra de quantifier les évolutions en largeur et en profondeur du chenal.

Pour ce document, le système de projection utilisé est une triangulation spéciale: les points du canevas trigonométrique ont été rapportés à une méridienne principale et sa perpendiculaire passant par l'arête aval de la culée gauche du pont de la Mulatière à Lyon. Ce pont a été détruit et le point n'est pas référencé au service géodésie de l'IGN, ni aux instances de gestion du Rhône. Le géoréférencement s'est donc fait par calage avec des points d'amer (recherche de points de correspondance entre la donnée source et l'image à géoréférencer) pris sur des cartes ou des photographies aériennes dont la projection est connue, à l'aide du module de rectification et de géoréférencement du logiciel ArcGis©. Mais, la sélection des points d'amer est complexe, car le milieu a été profondément transformé depuis un siècle et le repérage des points constants pose parfois des problèmes. De plus, sur ces cartes anciennes, le dessin n'a pas la précision des cartes actuelles. Les angles des bâtiments sont rarement droits et les copies sont

des sources d'erreurs constantes. L'erreur RMS (Root Mean Square) lors du recalage de la carte n'est au final pas négligeable. Son impact est à prendre en compte dans le calcul des marges d'erreur (Raccasi et al. 2005). La marge d'erreur finale est mentionnée dans le Tableau 1.

Pour le XXe siècle, les premiers documents utilisés sont les plans Branciard au 1/5000. Dressés en 1905, ils présentent un état «intermédiaire», postérieur de 40 ans environ aux endiguements, dont ils peuvent enregistrer les impacts à moyen terme, et contemporain de la mise en place des premiers casiers, mais antérieurs aux travaux de la CNR. Puis les cartes de l'IGN (1947) au 1/20000 et les plans avant travaux du palier d'Arles (196X, 1983) dressés par la CNR, à diverses échelles, permettent d'évaluer les premiers impacts de l'aménagement du bassin par la CNR.

L'information photographique

L'exploitation des photographies aériennes dans une étude diachronique requiert une attention particulière. Plusieurs paramètres sont nécessaires à prendre en compte. La présence de la végétation et d'ombres portées cache souvent la limite nette de la zone mouillée qu'il faut alors supposer. Le débit du cours d'eau le jour de la prise de vue est important: en période de crue, un chenal sera plus large que durant un épisode d'étiage sévère. Pour corriger cette donnée, il est nécessaire de connaître le débit du cours d'eau à l'heure de la prise de vue et d'avoir à disposition une typologie des berges. Une berge abrupte marquera moins de différences de largeur entre différents débits qu'une berge en pente douce (Raccasi et al., 2005).

Les photographies aériennes de 1979 (Davide et al. 2003) sont des produits de l'IGN, réalisées en noir et blanc à une échelle de 1/20000. Sur le Petit Rhône, elles représentent un état intermédiaire du système entre les cartes de 1947-49 et celles de 1994. Elles donnent une information supplémentaire sur les vitesses d'évolution du chenal. Ces photographies au format papier sont scannées à une résolution de 800 dpi puis rectifiées et géoréférencées avec le logiciel ArcGis©.

L'Orthophoto (Davide et al. 2003) de 2003 en couleur est livrée numérisée (50 cm. Pixel^{-1}) et géoréférencée. Elle constitue la donnée la plus récente pour constater les évolutions du milieu sur le Rhône en amont d'Arles.

Réalisation d'un SIG

Pour être comparées entre elles, les cartes et les photographies aériennes sont vectorisées une fois intégrées dans le SIG. Traditionnellement, les cartes topographiques représentent le chenal en eaux moyennes et les deux campagnes photographiques ont été réalisées également en eaux moyennes, ce qui limite les corrections sur la largeur du chenal dans la phase de vectorisation. Le SIG comprend deux types de «couches»: (1) les équipements avec leur date de mise en place et (2) les formes de l'occupation du sol à chaque date, dans la zone comprise entre les digues insubmersibles, réparties en cinq classes (fleuve et annexes fluviales, bancs de sables et de galets, végétation naturelle, zone agricole, urbanisation et industrialisation).

Résultats

Quatre situations différentes sont identifiables, par leur répartition spatiale et temporelle. Elles correspondent à 3 types d'équipement (casiers et digues/épis submersibles, digues-seuils de déconnexion des lônes, digues insubmersibles contre les inondations). Puis, l'analyse se concentrera sur l'évolution d'un tronçon pluri aménagé sur la longue durée (150 ans).

Impact des «aménagements à courant libre».

Les premières traces d'aménagements pour faciliter la navigation sont issues d'un rapport des Ponts et Chaussées, établi en 1862 par l'ingénieur Kleitz, (Kleitz 1862). Il mentionne «*Diverses observations faites sur le haut fond de Beaujeu*» entre les PK 292 et 295. Ce seuil, le plus élevé entre Arles et la

Arles Ecluse du canal d'Arles à Bouc PK 281.9	Aqueduc des Peysonnes PK 292.9	Notes
0	3.3	Sept. 1858 longue sécheresse
1	1.7	fév. 1860 après une crue de 2 mois
1.5	1.3	Août 1860 après une crue de 20 jours
2	1.7	Mesure 1862
3	2.57	Mesure 1862
4.3	3.7	Mesure 1862
5.58	4.97	Crue de 1860

Tableau 2: Hauteur d'eau (en m) du Rhône à Arles et au passage de Beaujeu (Kleitz 1862)

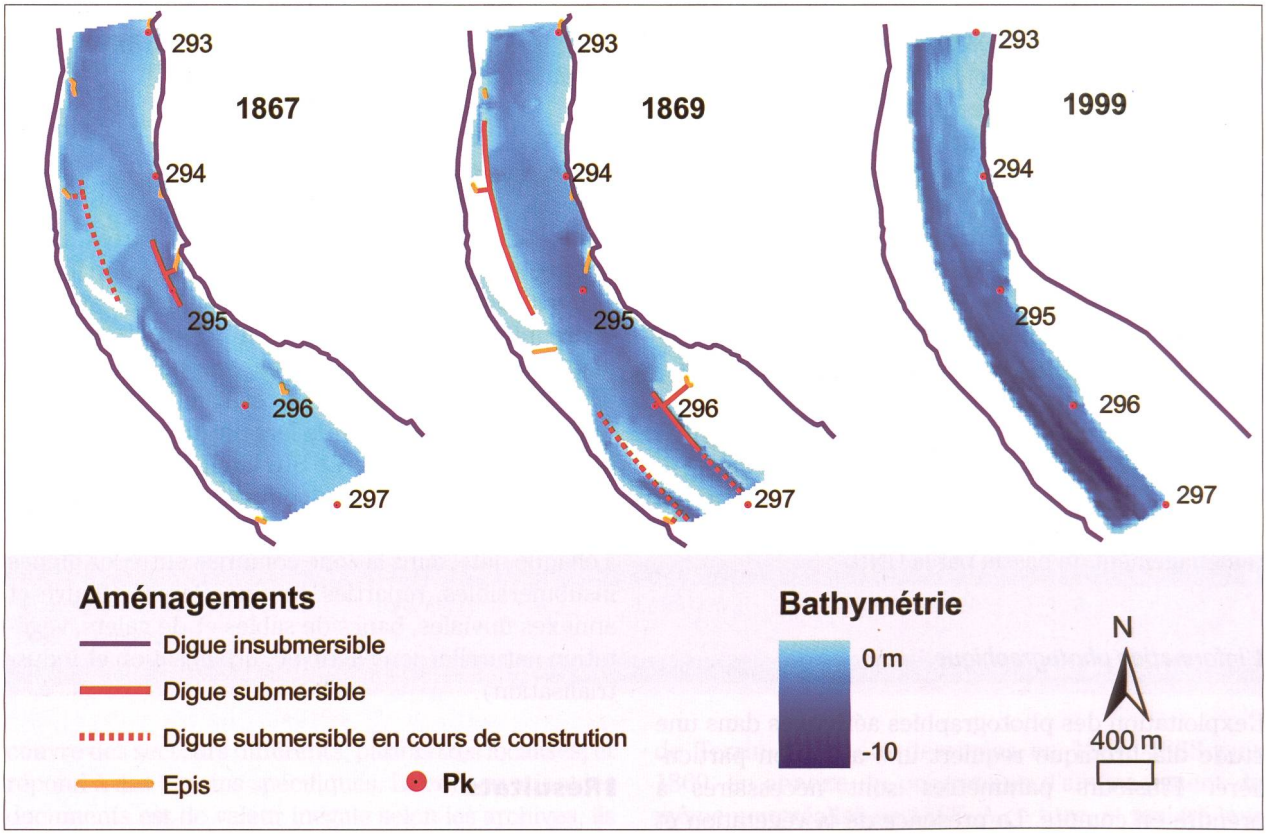

Fig. 2: Evolution morpho-bathymétrique du Grand Rhône au passage du seuil de terrain sous l'impact des aménagements pour la navigation.

mer, correspond à la traversée du substrat pléistocène constituant un bedrock au fond du chenal (L'Homer et al. 1987). La comparaison des hauteurs d'eau mesurées à Arles (PK 281,9) et à Beaujeu-Aqueduc des Peyronnes, PK 292 (Tableau 2), démontre la variabilité et la faible hydraulicité de ce secteur, soumis vraisemblablement à des stockages/déstockages sédimentaires au gré des crues. Elle met en évidence la nécessité d'un aménagement destiné à éviter les aléas hydrologiques. Le rapport «*propose d'assurer à la navigation le tirant d'eau normal dans les plus basses eaux, si ce résultat n'exige qu'une faible augmentation des dépenses*».

L'aménagement du secteur est réalisé à partir de 1867 entre les PK 293 et 297. Les archives fournissent des bathymétries et l'état d'avancement des travaux en 1867 et 1869, qu'il est intéressant de comparer à la campagne de bathymétrie réalisée par la CNR en 1999 (Fig. 2). Des épis et des digues longitudinales submersibles, raccordés à la berge, réduisent la largeur du chenal et y concentrent le flux hydraulique.

L'impact est immédiat sur la géométrie du chenal: la largeur moyenne passe de 730 m en 1867 à 600 m en 1869 (réduction de 43 m/an) et s'homogénéise sur le segment aménagé. La surface mouillée se réduit de 555. 10^3 m^2 sur les 2.8. 10^6 m^2 d'origine (soit 19%) entre 1867 et 1869. Dans le chenal, des mouilles de plus de 4m de tirant d'eau se forment, alors qu'avant les travaux la profondeur ne dépassait que rarement les 3 m.

Comparées à l'échelle séculaire, ces évolutions sont très rapides. En effet, en 1999, le chenal est large de 490 m (soit une réduction de 0,8 m/an depuis 130 ans), la surface mouillée s'est rétractée de 473. 10^3 m^2, soit 16% (1.8. 10^6 m^2 en 1999). Le chenal s'est fortement approfondi (1.1. 10^6 m^3 entre 1869 et 1999, dont 0.3. 10^6 m^3 sont liés aux déroctages artificiels du seuil entre 1962 et 1991), mais il est impossible d'assigner une fourchette chronologique précise à cette érosion.

A partir de 1884 et jusque dans les années 1920 de l'amont vers l'aval, l'ingénieur Girardon fait réaliser un nouveau type d'aménagement à courant libre sur la totalité du linéaire rhodanien. Les casiers Girardon sont des digues reliées à la berge par des tenons (formant des casiers). Ils concentrent les eaux dans le lit mineur à l'étiage et fixent les mouilles et les seuils (tout en les orientant). Ces aménagements ont un effet quasi instantané sur la morphologie du chenal puisque entre 1876 et 1920, la proportion de hauts fonds passe de 87% à 4% sur le Bas Rhône (Poinsard et Salvador 1993).

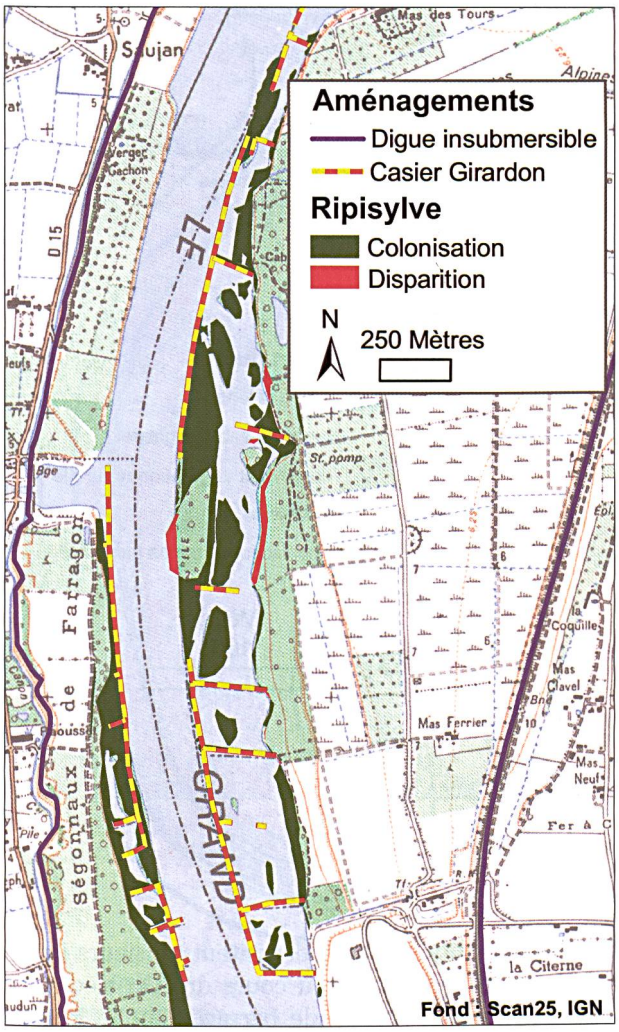

Fig. 3: Evolution de la ripisylve dans 2 casiers du Rhône entre 1947 et 2003 (© IGN PFAR 2000).

A l'amont d'Arles, dans les casiers de Faragon (PK 277.3 et 279) en rive droite et de Saxy (PK 276.6 et 279) en rive gauche (Fig. 3), la comparaison des cartes topographiques de 1947-49 et de l'orthophoto IGN de 2003 permet d'évaluer l'importance du colmatage et sa stabilisation par la ripisylve dans la seconde partie du XXe siècle.

Sur le casier de Faragon, la superficie en eau en 1947 (132 367 m²) est colonisée à 80% (106 754 m²) par la ripisylve en 2003. Sur le casier de Saxy (surface en eau: 692 346 m² en 1947), l'évolution est plus complexe. La concentration du flux au centre du chenal a provoqué au PK 277,5 la disparition d'un banc végétalisé situé hors du casier et l'érosion de la berge sur 450 m de long et 25 m de large. Mais, par ailleurs, le colmatage du casier constitue la tendance dominante, plus importante à l'amont de l'ouvrage, avec un gain de surface de 385 236 m², (soit 56% de l'espace initial) par la ripisylve. La différence de près de 30% dans l'évolution des deux casiers doit être reliée à leur taille (150 m de large à Faragon, 350 m à Saxy) et à la répartition des tenons dans le casier, plus dense à Farragon. Les flux sédimentaires, plus perturbés dans les petits casiers, y favorisent la sédimentation.

L'analyse diachronique d'images confirme donc la vitesse de réaction du milieu (quelques années) à l'implantation des aménagements à courant libre: réduction rapide de la largeur du chenal sur le seuil de Terrin, liée évidemment au rôle direct de l'ouvrage, derrière lequel s'effectue un colmatage sédimentaire. L'augmentation de la profondeur du chenal, voulue pour faciliter la navigation, semble décalée dans le temps, sans qu'il soit possible d'en préciser la chronologie. Les casiers en amont d'Arles, plus larges, démontrent la rétraction du chenal par colmatage latéral, qui se poursuit au cours du XXe siècle, progressant de l'amont vers l'aval de l'ouvrage.

Impact des aménagements de déconnexion des lônes.

Dès le milieu du XIXe siècle, une politique de fermeture systématique des lônes est destinée à réduire le nombre de bras pour faciliter la navigation. La Lône du Pillet (PK217-276), la plus importante en aval de Beaucaire, est fermée dans les années 1870.

Sur la carte des Ponts et Chaussées publiée en 1876, puis en 1876-77 avec une surcharge bathymétrique, le système fluvial à cet endroit est encore très proche du tressage: en eau moyenne, de nombreux bancs de sables ou graviers non végétalisés encombrent le chenal (Fig. 4). En rive droite, la lône est longée par la digue insubmersible; des perrés (murs bâtis en protection de berge) et enrochements préservent sa berge interne de l'érosion. Une grande digue (digue de Saint Denis), longue de 3 km, sépare l'entrée de la lône du chenal principal, sauf lors des fortes crues. La carte indique également le projet (réalisé en 1879-80) de déconnexion complète du système, par l'amont et l'aval, et le prolongement de la digue vers le sud (Digue de Ranchier, 1,1 km).

Dès 1876-77, la déconnexion est réalisée et une grande partie des bancs de sable au milieu du chenal du Rhône a disparu; un banc de sable en cours de végétalisation barre l'entrée de la lône. Le système est renforcé avant 1905, puisque les plans Branciard mentionnent la présence de seuils en travers de la lône, qui favorisent une mise en eau progressive de la lône par l'aval pendant les crues et son colmatage par des sédiments fins (SOGREAH 2000).

En 2003 (Orthophoto IGN), le système fluvial est complètement simplifié et la lône n'est plus parcourue par l'amont que par les crues supérieures à

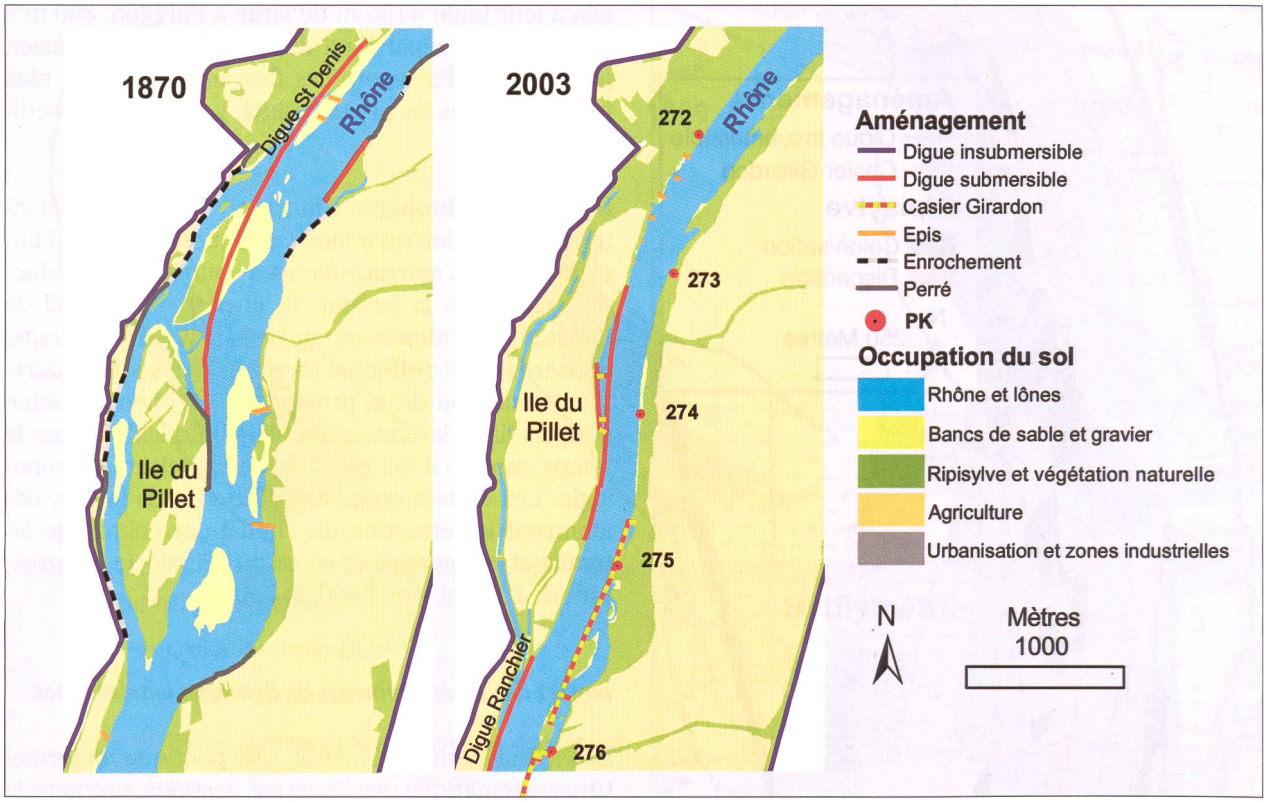

Fig. 4: Colmatage de la lône du Pillet.

7500 $m^3.s^{-1}$. Quinze sondages effectués au Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur (PANDA) le 20 juillet 2006 (CNR, non publié) montrent que le colmatage de la lône varie entre 0.6 et 4.1 mètres.

Le secteur de la fermeture amont reste cependant une zone mobile et fragile au cours du XXe siècle, le chenal tendant à rechercher sa convexité originelle. Des données intermédiaires (Plan Branciard, photographies aériennes IGN de 1962 et 1979) montrent en effet la succession d'un recul, puis d'une progradation latérale de la berge en amont du point de déconnexion, nécessitant la construction de 2 générations d'épis. La plus récente, dans les années 1970, en détournant le flux principal vers le centre du chenal, a provoqué une accrétion verticale (2 et 7 m au-dessus du niveau d'étiage) et latérale (de 60 à 110 m). L'étude chrono-stratigraphique de cette accumulation (Hellal et Villiet 2006) a montré le rôle constructeur des grandes crues de la dernière décennie, dont les apports sableux sont piégés par la ripisylve.

Ici aussi, le traitement d'images démontre la vitesse de réponse du système sédimentaire dans le courant du chenal (évacuation des bancs dans les premières années) et à l'entrée de la lône. Mais les ouvrages sont confrontés à la persistance des dynamiques hydrosédimentaires, qui nécessitent plusieurs interventions conservatoires au cours du XXe siècle. La construction de la série de barrages sur le Rhône, n'empêche pas le stockage d'épais apports sédimentaires.

L'impact des digues insubmersibles

La présence de digue insubmersible divise la plaine inondable en deux parties. Dans la partie intradigue, la vitesse d'accrétion verticale est accélérée par la concentration des dépôts sédimentaires pendant les crues. Il se produit rapidement un différentiel topographique important entre la zone intradigue soumise aux crues et la zone externe déconnectée du système fluvial et de ses apports sédimentaires. Sur le Petit Rhône, entre l'écluse de Saint Gilles (PK 300) et la mer (PK 335), le chenal n'est pas entretenu pour la navigation et conserve un fonctionnement «naturel». A partir du PK 330, la digue ne subsiste qu'en rive gauche à une distance très variable des méandres du chenal. Elle n'entrave pas la mobilité du premier d'entre eux (M_{libre}, du PK 330 à 333.5), mais contraint la rive gauche du second ($M_{contraint}$, du PK 332.8 à 335). La comparaison de l'évolution des deux systèmes repose sur l'utilisation des cartes de 1876, 1947-49 et 1994, et de la photographie aérienne de 1979 (Fig. 5).

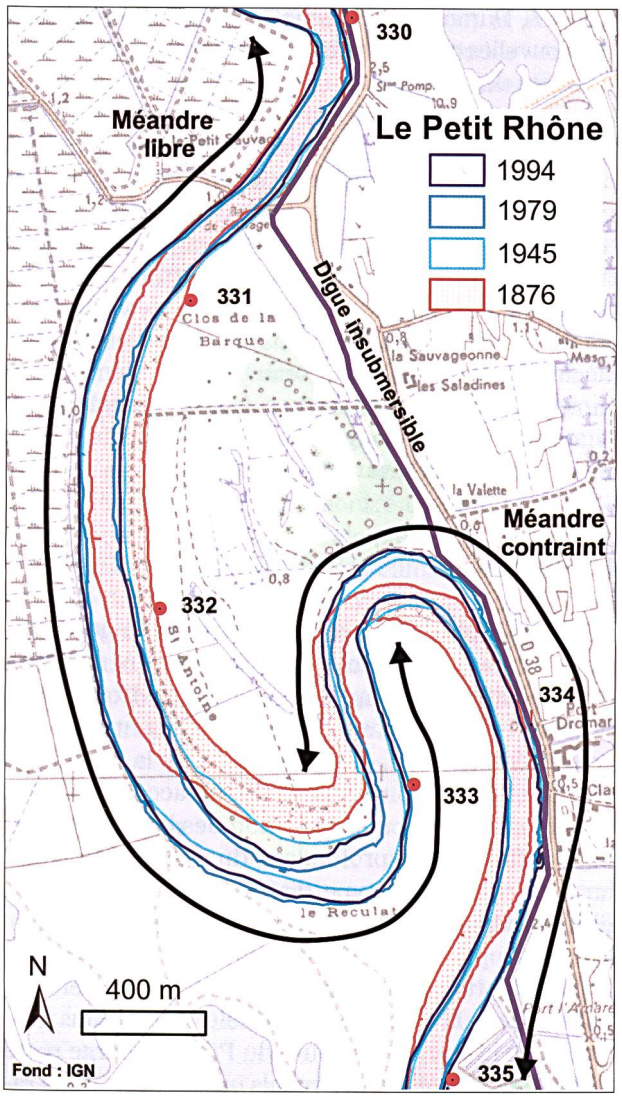

Fig. 5: Evolution du cours du Petit Rhône depuis 1876. (© IGN PFAR 2000)

La vectorisation des chenaux permet de calculer pour chaque date et chacun des méandres la longueur du talweg (L), la longueur d'onde (λ) et, à partir de ces deux valeurs, l'Indice de sinuosité (I_s) (Brice 1964):

$$I_s = L / \lambda$$

Le méandre M_l est en expansion (Lagasse et al., 2003) depuis 1876. La toponymie du lieu *le Reculat* laisse supposer qu'il évolue de cette façon depuis assez longtemps. La courbe de tendance de l'évolution de I_s dans le temps (Fig.6) a un coefficient de détermination (R^2) de 0.98, pour une équation de type $y=ax+b$: ce méandre a donc une évolution constante depuis au moins 1876. Le méandre $M_{contraint}$ ne connaît pas la même évolution. En 1876, son chenal longe la digue sur 250 m; sa migration latérale vers l'est s'effectue librement au niveau de l'apex amont, mais en aval, sur 1,5 km environ, elle est stoppée dès 1947-49 par la digue. L'indice de sinuosité passe de 2.84 à 3.43 entre 1876 et 1947-49, puis n'évolue plus jusqu'en 1994. A terme, on peut supposer que la migration libre et le blocage du méandre contraint vont provoquer le recoupement du lobe amont du méandre contraint.

La digue insubmersible bloque donc l'évolution naturelle des méandres deltaïques et «force» un possible recoupement. Les conséquences d'une telle évolution sont nombreuses, en particulier dans le cadre de la réflexion actuelle sur la conduite des eaux de crue vers la mer.

A l'échelle d'un tronçon pluri-aménagé sur 150 ans (Beaucaire-Arles)

Sur un tronçon fluvial de quelques kilomètres, les impacts des différents ouvrages interagissent entre eux. Il faut y ajouter, sur le palier d'Arles et les deux bras du Rhône deltaïque, la pratique actuelle des dragages dans le chenal, destinée à maintenir la ligne d'eau pour la navigation. Outre ce dernier type d'intervention, l'évolution morphologique du système fluvial entre Beaucaire et Arles (PK 270 à 280) est contrainte (1) par la présence des digues insubmersibles, qui délimitent depuis 150 ans un espace d'expansion des crues étroits (une centaine de mètres) en rive droite, très larges (supérieur au kilomètre) en rive gauche, (2) par la fermeture artificielle des bras secondaires, dont celui du Pillet, à la fin du XIXe siècle, (3) par les casiers construits sur les deux rives du chenal au début du XXe siècle, (4) par les perrés et les épis surtout présents dans la courbure concave en rive droite. Tous ces aménagements ont, en principe,

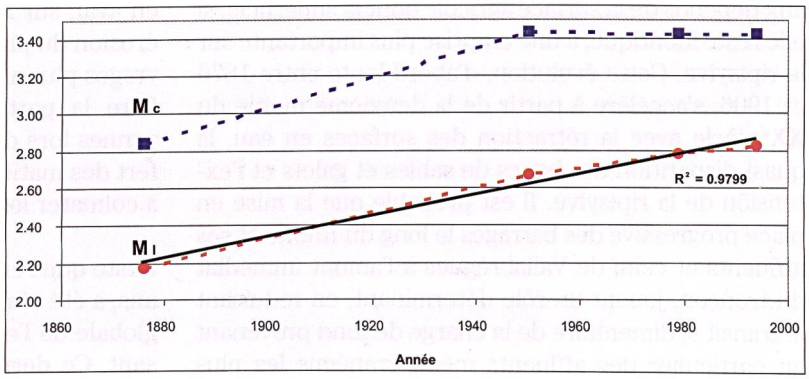

Fig. 6: Evolution de l'indice de sinuosité depuis 1876 pour les deux méandres

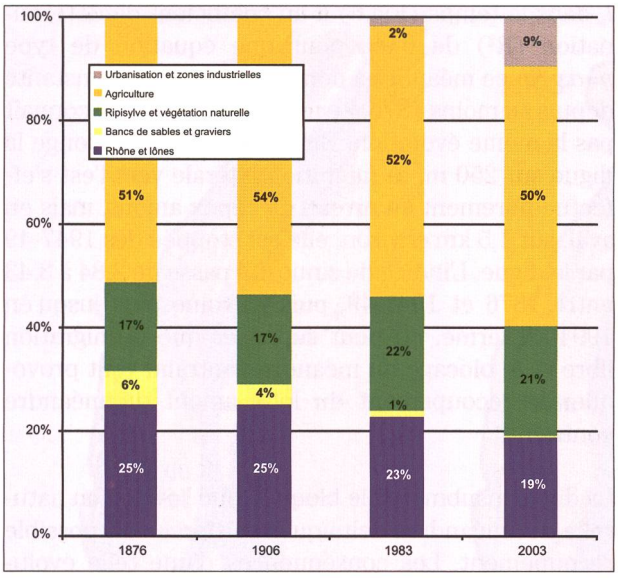

Fig. 7: Evolution des unités paysagères dans la zone intradigue du Rhône entre 1876 et 2003.

des effets convergents: ils sont destinés à approfondir et simplifier le lit fluvial et à concentrer les écoulements dans un espace réduit.

Comme sur tous les grands fleuves aménagés, la métamorphose du système fluvial est importante (Klingeman et al. 1994; Poinsard et al. 1989). Elle est analysée ici par le biais de l'évolution en % des unités paysagères comprises entre les digues, à quatre dates entre 1876 et 2003 (Fig. 7). La surface en eau, représentant le chenal du Rhône et ses bras secondaires, est passée de 25 à 19% du territoire: les bras secondaires sont colmatés ou rétrécis, et souvent recouverts par une forêt «galerie» qui les rend invisibles; le chenal principal s'est rétréci, souvent en relation avec un net approfondissement (Antonelli 2002). Les bancs de sables et galets, qui formaient plus de 6% des surfaces en 1876 ont totalement disparu: les îlots ont été évacués, les grèves en pied de berge sont végétalisées. La ripisylve passe en effet de 17 à 21% malgré le grignotage par l'agriculture sur sa face externe: elle est constituée en 2003 de boisements vieillis, impénétrables, dont la gestion devient impérative. L'urbanisation, enfin, occupe en 2003 presque 10% de l'espace intra-digues, aux dépends de la surface agricole dont la superficie, si elle reste identique, a une emprise plus importante sur la ripisylve. Cette évolution, d'abord lente entre 1876 et 1906, s'accélère à partir de la deuxième moitié du XXe siècle avec la rétraction des surfaces en eau, la quasi-disparition des bancs de sables et galets et l'extension de la ripisylve. Il est probable que la mise en place progressive des barrages le long du Rhône et ses affluents et celui de Vallabrègues à l'amont immédiat du tronçon, jouent un rôle déterminant, en réduisant le transit sédimentaire de la charge de fond provenant en particulier des affluents méditerranéens les plus proches, Durance et Ardèche: le chenal se ré-ajuste à ces nouvelles conditions en remobilisant les sédiments grossiers des berges et du fond.

L'ensemble des ouvrages de la fin du XIXe et du début du XXe siècle induisent une évolution progressive pendant plusieurs décennies. C'est l'intervention d'un forçage externe, celui des barrages hydro-électrique sur l'ensemble du bassin versant, relevant d'une technologie plus «massive», qui accélère la transformation du milieu à partir du milieu du XXe siècle. Le système est désormais très fortement anthropisé. Lors des fortes crues, la réduction de la débitance du chenal augmente l'élévation du niveau d'eau et réduit la revanche des digues.

Discussion

Le rôle morphogène local des ouvrages de génie fluvial n'est pas contestable. Ils induisent généralement une modification rapide de leur environnement proche, en modifiant le transit sédimentaire: piégeage sédimentaire, donc réduction de la largeur du chenal et extension de la ripisylve, accélération du flux dynamique, donc évacuation des bancs mobiles. Leurs effets sur la profondeur du chenal, qui est le but principal de ce type d'aménagement, semblent différés dans le temps (Pinter and Heine 2005).

Mais l'importance de leurs impacts est également variable selon la morphologie locale. Ainsi dans l'intrados de la grande courbure du Pillet, la berge reste instable et soumise à des reculs ou des accrétions rapides, malgré son aménagement par la fermeture du bras secondaire, puis des perrés et épis. Au contraire, l'approfondissement du seuil de Terrin n'est réalisé de façon efficace que par le déroctage artificiel tardif du substrat, malgré l'implantation précoce de casiers destinés à cet effet.

On a montré l'impact à distance de la retenue hydroélectrique de Vallabrègues. L'incision du chenal, liée à la rétention sédimentaire de la charge de fond dans le barrage et le Rhône court-circuité, est importante sur le secteur étudié, mais elle s'amortit moins de 10 km en aval, sur le palier d'Arles (Antonelli 2002). Cette érosion du plancher alluvial renforce l'impact des ouvrages plus anciens. Il reste cependant impossible de faire la part du rôle de chacun. L'ouverture des vannes lors des fortes crues ne modifie pas le transfert des matières en suspension, qui continuent donc à colmater les casiers.

Reste que l'ensemble des aménagements, depuis 150 ans, a été réalisé dans un contexte de transformation globale de l'environnement à l'échelle du bassin versant. Ce dernier subit en effet le passage d'une so-

ciété agraire, où l'agriculture extensive et l'élevage occupent largement l'espace, y compris les versants montagnards fragiles, à une société urbaine, caractérisée par l'extension spectaculaire des forêts et la réduction des terres cultivées. Les bilans érosifs en sont affectés et la charge solide des rivières réduite. Sur le bas Rhône, on estime que le flux de MES passe de 60 à 6-8 millions de tonnes par an (Mt/an) (Maillet 2005; Pardé 1925). La réduction de la charge de fond est aggravée par les 2 Mt de prélèvements sur l'ensemble du bassin versant (SOGREAH, 2000) et par les aménagements hydro-électriques. Par ailleurs, on connaît mal encore les effets du changement climatique sur les débits et le régime du fleuve, sur la fréquence des fortes crues. Mais les travaux des historiens (Pichard 1999) ont montré que la fin du Petit Age Glaciaire, dans la seconde partie du XIXe siècle, espaçait les évènements hydro-climatiques. On peut donc se demander si les ouvrages locaux auraient été aussi efficaces dans un autre contexte: le Rhône du XIXe siècle, tressé, large et mobile, n'a peut-être pu être transformé que parce que les conditions générales naturelles évoluaient elles-mêmes.

Conclusion

On retiendra cependant que l'analyse d'images montre l'impact évident des ouvrages de génie fluvial, qui génèrent des réponses morphologiques locales rapides, en particulier sur la largeur du chenal. Leurs répercussions semblent plus lentes sur l'évolution verticale de la géométrie du chenal. La durée de l'efficacité de ces ouvrages est variable, selon la vigueur des dynamiques auxquelles ils sont soumis et selon leur taille: les casiers les plus larges ne sont colmatés qu'à 50% et continuent à piéger des MES. Les impacts des différents ouvrages convergent et ne présentent pas d'effets contradictoires entre eux (casiers, épis). Les digues insubmersibles jouent un rôle particulier en bloquant l'espace de divagation naturelle du fleuve dans le delta, en particulier sur le Petit Rhône. Mais l'efficacité des aménagements est renforcée par la réduction des apports issus du bassin-versant, dans un contexte plus global de changements socio-économiques et climatiques; il est donc difficile d'évaluer complètement leur impact propre. Ils continuent à modifier les paysages actuels (colmatage inachevé et continu des casiers, piégeages sédimentaires par les épis lors des fortes crues récentes).

Remerciements

Les auteurs remercient la région Provence Alpes Cote d'Azur, le Syndicat de gestion des digues du Rhône (SYMADREM) pour le financement de ce travail, la CNR et le CEMAGREF pour leur collaboration scientifiques, ainsi que les étudiants du Master SET du CEREGE qui ont participé à ce travail.

Références

- **Allinne C.** 2005. Les villes antiques du Rhône et le risque fluvial. Gestion des inondations dans les villes romaines. L'exemple de la basse vallée du Rhône, université de Provence (Aix-Marseille I), Aix en Provence, 348 pp.
- **Antonelli C.** 2002. Flux sédimentaires et mophogenèse récente dans le chenal du Rhône aval, Université de Provence, Aix en provence, 272 pp.
- **Arnaud-Fassetta G.** 2003. River channel changes in the Rhone Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. CATENA, 51(2): 141-172.
- **Brice JC.** 1964. Channel patterns and terraces of the Loup Rivers in Nebraska. U.S. Geological Society, Washington.
- **Bruneton H.** 1999. Evolution holocène d'un hydrosystème nord-méditerranéen et de son environement géomorphologique. La plaine d'Arles, Universié Aix-Marseille 1, Aix en Provence, 363 pp.
- **Davide V, Pardos M, Diserens J, Ugazio G, Thomas R, Dominik J.** 2003. Characterisation of bed sediments and suspension of the river Po (Italy) during normal and high flow conditions. Water Research, 37(12): 2847-2864.
- **Galloway WE.** 1975. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaïc depositionnal systems. In: B. M.L (Editor), Deltas. Houston Geological Society, Houston, pp. 87-98.
- **Hellal M, Villiet J.** 2006. Sédimentation d'une berge du Rhône entre Beaucaire et Arles. Master 2 Thesis, Université de Provence Aix Marseille 1, Aix en provence, 94 pp.
- **Ibanez C, Pont D, Prat N.** 1997. Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: Abasis for defining and classifying salt-wedge estuaries. Limnology and Oceanography, 42(1): 89-101.
- **Kleitz** 1862. Amélioration du Rhône maritime, avant projet général, Ponts et chaussées.
- **Klingeman C, Bravard JP, Giuliani Y.** 1994. Les impacts morphodynamiques sur un cours d'eau soumis à un aménagement hydroélectrique à dérivation: le Rhône en Chautagne (France). Revue de Géographie de Lyon, 1: 73-87.
- **L'Homer A, Roux M, Toni C, Bazille F, Durozoy G.** 1987. Arles 1/ 50 000, Carte géologique de la France. BRGM, Orléans.
- **Lagasse PF, Spitz WJ, Zevenbergen LW.** 2003. A methodology for arcview tools for predicting channel migration. In: ESRI (Editor), ESRI, User Conference Proceedings, San Diego, California, USA.
- **Maillet G.** 2005. Relation sédimentaires récentes et actuelles entre un fleuve et son delta en milieu microtydal: exemple de l'embouchure du Rhône, Université de Provence, Aix Marseille 1, Aix en Provence, 331 pp. http://www.epoc.u-bordeaux.fr/ASF/theses/2005/MAILLET_2005.pdf
- **Pardé M.** 1925. Le régime du Rhône, étude hydrologique. Thèse de doctorat Thesis, Université de Grenoble, 1323 pp.
- **Pelletier M.** 2004. Dossier Cassini, pp. 17.
- **Pichard G.** 1995. Les crues sur le bas Rhône de 1500 à nos jours. Pour une histoire hydro-climatique. Méditerranée, 3-4: 105-116.
- **Pichard G.** 1999. Espace et nature en provence: l'environement rural 1540-1789, Université de Provence Aix-Marseille 1, Aix en Provence.
- **Piegay H, Walling D, Landon N, He Q, Liebault F, Petiot R,** 2004. Contemporary changes in sediment yield in an alpine mountain basin due to afforestation (the upper Drome in France). CATENA, 55(2): 183-212.
- **Pinter N, Heine RA.** 2005. Hydrodynamic and morphodynamic response to river engineering documented by fixed-discharge analysis, Lower Missouri River, USA. Journal of Hydrology, 302(1-4): 70-91.
- **Poinsard D, Bravard JP, Caclin MC.** 1989. Profil en long et granulométrie du lit des cours d'eau aménagés: l'exemple du canal de Miribel (Haut-Rhône). Revue de Géographie de Lyon, 64(4): 240- 251.
- **Poinsard D, Salvador PG.** 1993. Histoire de l'endiguement du Rhône à l'aval de Lyon. In: D. Erudition (Editor), colloque international «Le fleuve et ses métamorphoses» 13-15 mai 1992, Lyon, pp. 299-314.
- **Raccasi G, Provansal M and Jugaru L.** 2005. Incertitudes inhérentes à l'acquisition et au traitement de données anciennes dans la mise en place de modèle 2D, 3D et diachronique. Cas de deux milieux fluviaux: le bas Rhône et le delta du Danube, 17e journées scientifiques de la société d'écologie humaine: Incertitude et environnement, Arles, France.
- **SOGREAH** 2000. Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide, Volet 1: Analyse de l'état actuel, diagnostic par aménagement, EPTB, Valence.
- **Vella C.** 1999. Perception et évaluation de la mobilité du littoral holocène sur la marge orientale du delta du Rhône, Université d'Aix-Marseille 1, Aix en Provence, 217 pp.
- **Volcot J.** 2001. La métamorphose du Bas Rhône, Université de Paris VII- Jussieu, Paris, 190 pp.