

*Projet Interrégional Plan Rhône
2007-2013*

Le pont d'Avignon

Numérisation et restitution 3D
de l'ouvrage d'art et du paysage fluvial



Avril 2009 – V2.3

1. Présentation du site

Le pont Saint Bénézet, couramment appelé pont d'Avignon en dehors d'Avignon, est un pont construit (ou reconstruit) de 1177 à 1185 dont il ne reste aujourd'hui que quatre arches. Sur 920 mètres, 22 arches et 4 mètres de large il permettait de franchir le Rhône pour relier Avignon à Villeneuve-lès-Avignon.

En 1226, après le siège terrible que Louis VIII fit subir à la ville, le pont fut détruit aux trois quarts. Les Avignonnais, placés sous la co-seigneurie de Charles d'Anjou et d'Alphonse de Poitiers, regagne la bienveillance royale et obtiennent, en 1237, l'autorisation de le restaurer. Il s'agissait surtout de refaire les tabliers de bois incendiés au cours du siège et d'en reprendre les piles, toutes fort endommagées. Au lieu du grand appareil antique dont quelques vestiges subsistent sur les dernières piles orientales, on recourut pour la réfection à l'appareil moyen alors usuel dans la construction régionale. Le tablier, primitivement accessible par une rampe, côté avignonnais, se trouvait à une dizaine de mètres au-dessus de l'étiage et venait aboutir à flanc de rocher, sur la rive villeneuvoise, contre l'épaulement calcaire surplombant le fleuve à cet endroit.

Avec l'installation de la cour pontificale à Avignon, et surtout le séjour régulier des papes Clément VI et Innocent VI sur la rive opposée, l'entretien sera constamment assuré et le pont soigneusement réparé et reconstruit.

Ce pont de bois allait être ravagé plusieurs fois par le feu au cours du schisme, et particulièrement pendant le siège fait à Benoît XIII, retranché dans le palais des Papes. La moitié du pont brûle dans la nuit du 20 au 21 juin 1395.

Le 22 septembre 1398, les partisans du pape incendient à nouveau le pont ; il faut attendre 1409 pour que l'on puisse à nouveau le franchir mais pour peu de temps puisque les hommes de Rodrigue de Luna le brûlent le 10 mai 1410 et détruisent une arche le 6 septembre suivant. Il faut attendre 1418 pour que soit rétabli le pont endommagé et rompu par les Catalans.

Malgré des travaux constants, une inondation emporte deux arches en 1573.

A partir du XVII^e siècle, la ville ne put supporter la charge des travaux d'entretien et de réparation. En 1603, suite à de fortes crues du Rhône, une arche s'effondre, puis trois autres en 1605. Les travaux de réparation ne débutèrent qu'en 1628, interrompus par une épidémie de peste, le pont ne sera utilisable qu'en 1633. Puis deux nouvelles arches sont emportées par le Rhône. L'édifice devenu obsolète du fait de l'étroitesse de sa chaussée, miné par le courant et les crues, s'écroule en partie au cours des années 1630.

Parmi les contentieux entre les maîtres de l'une et de l'autre rive, la question cruciale de la propriété du Rhône resta pendant longtemps d'actualité ; les légistes du souverain prétendaient qu'elle s'étendait jusqu'à la rive orientale. De mémoire d'homme, le courant principal du fleuve avait toujours longé cette dernière, et c'est naturellement de ce côté que s'était fixée la plus importante activité portuaire. Or, vers les années 1670, le bras occidental connut une considérable augmentation de débit : il n'en fallait pas plus pour amener les gens du roi à imaginer la confiscation du fleuve au pontifical voisin, en détournant le cours, et donc la navigation commerciale, au profit de Villeneuve. C'est à partir de cet époque que l'on va insensiblement se résoudre à laisser s'écrouler le pont à l'avantage de celui, plus au nord, de Saint-Esprit (construit entre 1269 et 1309).

À cette époque, diverses manières sont utilisées pour traverser le fleuve. Une île, la Barthelasse aujourd'hui, s'était formée au milieu du lit du fleuve. On partait de la tour Philippe-le-Bel, en royaume de France située du côté de Villeneuve-lès-Avignon, d'où on

traversait jusqu'à l'île en bac. On traversait ensuite l'île à pied en suivant un chemin qui menait, par l'intermédiaire d'un escalier de bois, aux quatre dernières arches du pont pour finalement atteindre la ville d'Avignon.



Le pont d'Avignon
La tour et le châtelet. Dessin de l'album Lancel, seconde moitié du XVII^e siècle

Le pont menaçait tant de s'effondrer que les reliques de Saint Bénézet furent enlevées de la chapelle St Nicolas, en 1674. Elles furent transférées au cloître des Célestins. Après plusieurs déménagements et une profanation en 1791, il ne subsiste que quelques restes de la dépouille, ils sont conservés à la cathédrale de Notre-Dame-des-Doms. Du pont lui-même, il nous reste les quatre célèbres arches et son ouvrage d'entrée sur la rive droite, connu aujourd'hui sous le nom de tour Philippe-Le-Bel, du côté de Villeneuve-lès-Avignon, et bien sûr la célèbre chanson qui a fait le tour du monde. Du précédent pont ne subsiste aujourd'hui que la chapelle dite basse car le tablier du second pont fut surélevé, la chapelle St Nicolas est dite chapelle supérieure car construite sur le nouveau tablier.

La chronologie des destructions du Pont et des déplacements de la ligne de plus grande profondeur doit être mise en relation avec l'histoire naturelle du fleuve. Ce dernier connaît en effet de profondes mutations à partir du XIV^{ème} siècle, induites par la « crise » du Petit Age Glaciaire. Un afflux important de sédiments et la fréquence plus élevée des fortes crues transforment l'aspect du chenal et mettent l'ouvrage à dure épreuve, dès la fin du XVI^{ème} siècle. La réduction globale de l'espace disponible dans le chenal favorise les inondations et la mobilité du lit, modifiant le paysage riverain. Un peu plus tardivement, la confluence de la Durance, affectée à son tour, perturbe l'écoulement du Rhône sur le site avignonnais.

2. Contexte scientifique

La question du pont est inséparable de celle du Rhône et c'est pourquoi nous souhaitons par ce projet de numérisation et de modélisation 3D, tant de l'édifice lui-même que de celui de ses abords, contribuer à re-visiter un site patrimonial de première importance en rétablissant, virtuellement, ce lien entre les deux rives qui, après la disparition du pont romain d'Arles, constitua pendant longtemps le seul franchissement au-dessus du fleuve entre Valence et la mer.

Dans la partie de son cours qui intéresse le Pont Saint Bénézet, le Rhône a connu des évolutions significatives qui ont profondément modifié son tracé. Il importera dans ce projet de retrouver les cotes altimétriques et la forme du chenal de l'époque afin de comprendre et faire comprendre le mode de franchissement du fleuve. Il sera fait appel aux outils numériques pour recréer virtuellement le paysage à l'époque de son franchissement par le pont Saint Bénézet.



Plan d'Avignon, gravé en 1635 par Mérian
Musée du Vieil Avignon

Le laboratoire MAP (UMR 694) et le CIRCA ont entamé en 2008 un ambitieux programme d'exploitation des outils numériques au service du patrimoine. Ce programme a démarré avec le soutien du Ministère de la Culture et de la Communication dans le cadre des appels à projets de son Plan de numérisation et a porté sur l'église de la Chartreuse dont le chœur est

effondré. Les journées européennes du patrimoine 2008 ont été l'occasion de mettre en place dans l'église un dispositif de réalité augmentée qui a vocation à devenir permanent.

Ce programme capitalise notamment les nombreux relevés par scanner laser 3D effectués depuis 2003 par les élèves ingénieurs de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) et par les étudiants de l'Ecole nationale supérieure d'architecture de Marseille suivant le cycle de formation de spécialisation « Culture numérique et patrimoine architectural ».

Soutenu par le Plan de numérisation du Ministère de la Culture et de la Communication, le laboratoire MAP conduit en 2009, en collaboration avec le Centre Interrégional de Conservation et de Restauration du Patrimoine de Marseille (CICRP), un projet de mise en valeur en 3D et de restauration virtuelle des fresques de Matteo Giovannetti de la chapelle Saint Jean Baptiste à la chartreuse de Villeneuve-les-Avignon.

Dans le cadre de l'appel à projets ANR « Blanc » 2009, les laboratoires MAP (UMR 694) et LAMM (UMR 6572) soumettent une proposition portant sur la réalisation d'un système d'informations architecturales et archéologiques en 3D (SIA3D) dont le terrain d'expérimentation est constitué par la Chartreuse de Villeneuve-lès-Avignon.

Ainsi dans le cadre du projet « Chartreuse numérique » porté par le CIRCA prend corps un important volet sur l'architecture et l'archéologie.

Dans ce cadre, il est de première importance de prendre en considération le site au sens large en intégrant les autres édifices majeurs : Fort Saint André, Tour Philippe-Le-Bel, Pont d'Avignon, Palais des Papes ainsi que le paysage fluvial dans sa dimension historique mais aussi dans sa dimension environnementale. Le site de la Chartreuse est situé sur un point haut, au-dessus de la plaine d'inondation naturelle du Rhône. Celle-ci est soumise à des submersions fréquentes au cours des temps modernes, dont il est possible de retracer quelques lignes de circulation des eaux.

C'est pourquoi ce projet doit comprendre un important volet de restitution en 3D du paysage fluvial comme outil de synthèse des connaissances.

3. Présentation du projet

Ce projet interdisciplinaire permettra de réaliser une maquette numérique du pont dans son territoire qui pourra être déclinée suivant ses différentes périodes d'activité ou d'abandon dans des dispositifs multimédia on-line ou off-line.

La maquette numérique pourra en particulier être exploitée dans plusieurs installations de réalité augmentée de part et d'autre du Rhône : extrémité du pont côté avignonnais, au niveau du châtelet d'entrée côté villeneuvois, terrasse supérieure de la tour Philippe-le-Bel, rocher des Doms, fort Saint André par exemples.

Par ailleurs, outre les déclinaisons Internet qui viendraient nourrir les portails touristiques sur le web des deux cités reliées jadis par ce pont, un étage de la Tour Philippe Le Bel pourrait accueillir un centre d'interprétation sur le pont Saint Bénézet dans son environnement fluvial. Tirant profit de la maquette numérique de l'ouvrage d'art dans son paysage fluvial, ce centre d'interprétation pourrait largement faire appel aux TIC.

Le projet se fera au sein d'une collaboration entre les organismes suivants :

- le laboratoire « Modèles et simulations pour l'architecture, l'urbanisme et le paysage » (MAP – UMR 694) , porteur du projet ;
- le laboratoire d'archéologie médiévale méditerranéenne (LAMM – UMR 6572) ;
- le CEREGE (UMR 6635) pour la restitution des paysages fluviaux (chenal et plaine d'inondation) ;
- le Centre National des Ecritures du Spectacle dans le cadre de son projet « Chartreuse numérique » ;
- les villes d'Avignon et de Villeneuve-lès-Avignon (service culturel, tourisme).

Le projet comportera six phases :

- le relevé des arches restantes et des vestiges sur la rive gauche du Rhône ;
- le relevé de la Tour Philippe-Le-Bel ;
- la réalisation de la maquette 3D de la partie existante du pont ;
- les restitutions en 3D des ouvrages annexes du châtelet en rive droite et des différentes portions disparues (pierre, bois) du pont;
- la réalisation de la maquette 3D du paysage fluvial dans la portion du cours du Rhône intéressée par le pont à l'époque de son activité (1180 – 1600 environ), à partir d'une modélisation 3D du territoire actuel (7 x 7 km environ) ;
- la réalisation des contenus destinés aux dispositifs de réalité augmentée, aux dispositifs multimédia interactif du centre d'interprétation, aux déclinaisons Internet ;

3.1 Les relevés

Les relevés feront appels :

- aux scanners laser 3D ;
 - à la photographie numérique HD, au sol et aérienne à très basse altitude ;
 - à la topographie.
-

La plateforme technique du laboratoire MAP est en mesure de traiter l'ensemble des questions de relevé et de restitution 3D posées par ce projet :

- pour relever la partie existante du pont on utilisera principalement des scanners laser 3D longue distance (TRIMBLE GS200 et TRIMBLE GX). Ces scanners peuvent acquérir de 2 à 200 m 5.000 points 3D à la seconde sur $360^\circ \times 70^\circ$. La maille du relevé devrait être de l'ordre 3 à 5 cm, compatible avec le niveau de précision géométrique de la maquette numérique à réaliser. Le TRIMBLE GS200 peut être mis en position horizontale pour acquérir les informations métriques sur tout type de voûte. Ces scanners peuvent travailler quel que soient les conditions d'éclairage ;
 - pour le relevé de la Tour Philippe-le-Bel on utilisera, pour l'extérieur des scanners laser 3D longue distance (TRIMBLE GS 200 et TRIMBLE GX), pour l'intérieur, un scanner laser 3D à décalage de phase FARO Photon 80 , ce dernier est capable d'acquérir de 2 à 80 m 120.000 points 3D à la seconde sur $360^\circ \times 320^\circ$, cette rapidité doublée d'une précision de l'ordre de 3 mm à 25 m en fait l'outil idéal pour les relevés à l'intérieur des bâtiments ;
 - pour le relevé photographique HD on utilisera des boîtiers numériques reflex professionnels NIKON D3X et D300 (capteurs à 12 ou 24 millions de pixels) équipés des focales adaptées. La photographie aérienne à basse altitude sera réalisée à partir d'un drone civil hélicoptère COPTER 4 ou d'un ballon dirigeable de 35 m^3 motorisé et doté d'une tourelle gyrostabilisée emportant les capteurs ci-dessus ;
 - le laboratoire exploitera également les données IGN actuelles sur le territoire concerné ainsi que les informations des historiens, archéologues et hydrologues ayant étudiés le fleuve dans cette portion.
-

3.2 La maquette 3D du pont

En s'appuyant, d'une part, sur les relevés précis effectués sur les quatre arches restantes et, d'autre part, sur les éléments rassemblés par les historiens et les archéologues du LAAM, l'équipe GAMSAU (école nationale supérieure d'architecture de Marseille) du laboratoire MAP réalisera la maquette 3D du pont et proposera une restitution de la partie disparue jusqu'à son châtelet de la rive droite.

Les restitutions du pont prendront en compte les différents états : blocs maçonnés, pont de bois.

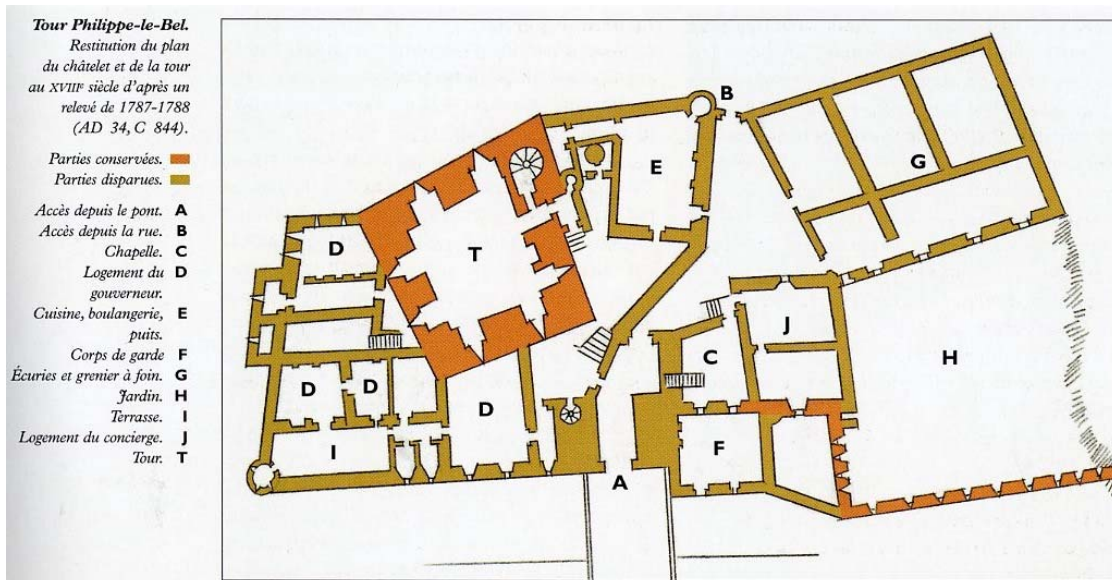


Détail du plan levé par l'ingénieur du roi Montaigu, lié au projet de Vauban visant à détourner le cours du Rhône sur Villeneuve-lès-Avignon daté du 15 janvier 1685. Au débouché Villeneuvois, on discerne, coloré en rose, le faubourg dit de la Tour avec, de part et d'autre la colline de Beauvoir. Paris, Archives Nationales

Ci-dessus le relevé le plus ancien de l'ouvrage d'art dans son site fluvial. Il montre à quel point le pont se trouve délabré et impraticable à cette époque et donc l'important travail de recherche dans les archives que nécessitera sa restitution.

3.3 La maquette 3D de la tour Philippe-le-Bel

En s'appuyant, d'une part, sur les relevés précis effectués sur la tour (intérieur et extérieur) et, d'autre part, sur les éléments rassemblés par les historiens et les archéologues, l'équipe GAMSAU (école nationale supérieure d'architecture de Marseille) du laboratoire MAP réalisera la restitution de la tour et de ses ouvrages annexes aujourd'hui disparus.

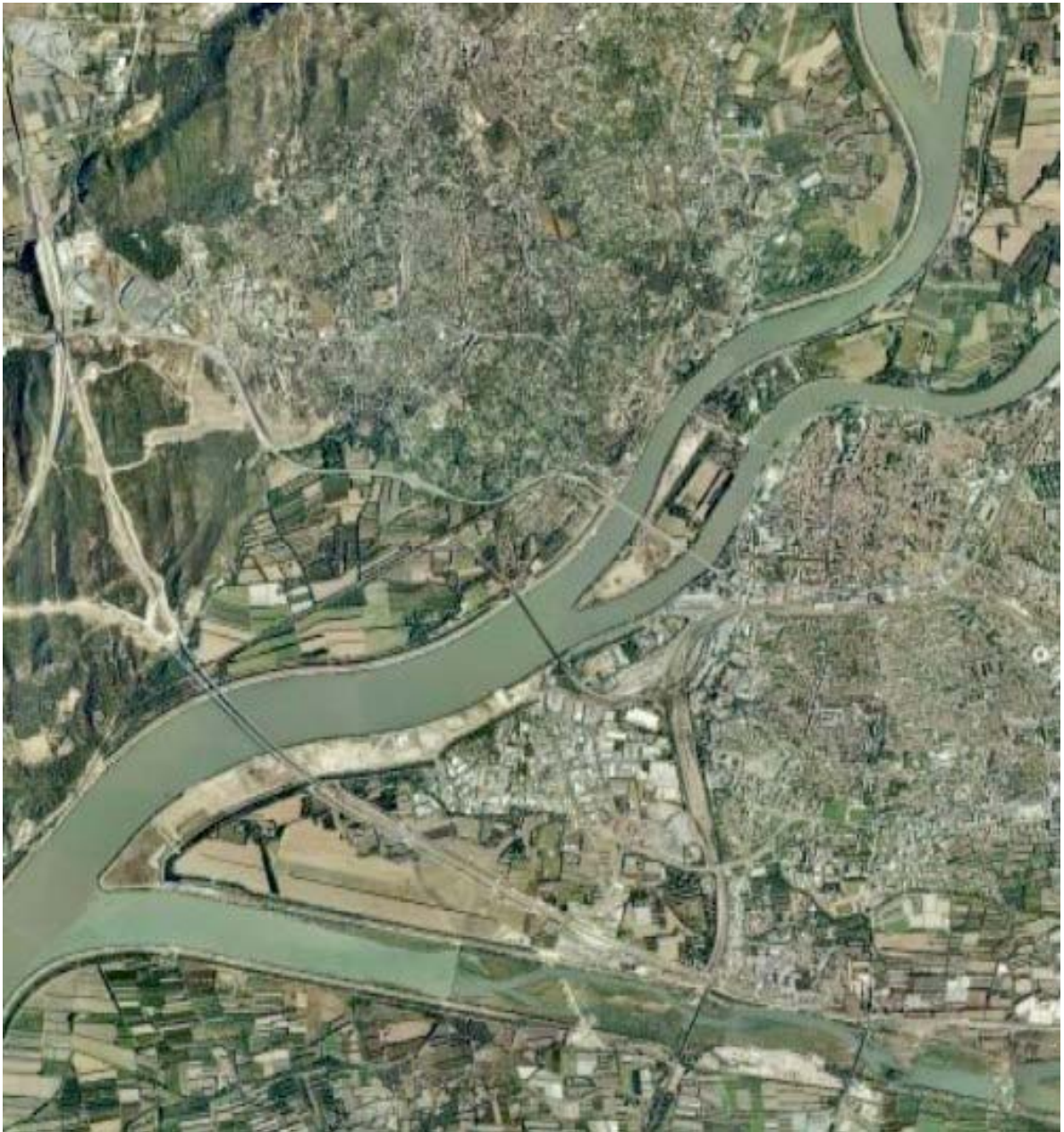


Tour Philippe-le-Bel. Restitution du plan du châtelet et de la tour au XVIII^e siècle d'après un relevé de 1787-1788 (AD 34, C844) in [1]

3.4 La maquette 3D du paysage fluvial

La restitution 3D du pont d'Avignon ne peut s'envisager sans replacer l'ouvrage d'art dans son contexte géographique et topographique de l'époque. Aujourd'hui, les outils de modélisation 3D du territoire capable de simuler le paysage à toutes les échelles rendent possible une telle visualisation.

En s'appuyant, d'une part, sur les données IGN (BD ortho et BD Topo) et, d'autre part, sur les données historiques, archéologiques, archivistiques et géomorphologiques et les compétences des spécialistes du fleuve associés au projet, le laboratoire MAP est en mesure de réaliser une maquette 3D d'une portion de territoire d'environ 7 x 7 kms incluant la ville d'Avignon dans ses remparts, Villeneuve-lès-Avignon et le puy Andaon ainsi que la confluence Rhône-Durance.



Emprise de la zone d'intérêt 7 x 7 km

Cette maquette 3D permettrait de comprendre et faire comprendre la mobilité du paysage fluvial et les contraintes variables qu'il a posées pour le franchissement du fleuve par un ouvrage d'art. La configuration actuelle du fleuve, très artificialisée et figée par les aménagements, ne permet pas de comprendre les caractéristiques très mobiles du système fluvial au cours des siècles précédents. Il ne s'agit pas de réaliser une maquette numérique des villes d'Avignon et de Villeneuve-lès-Avignon mais bien de recréer le paysage urbain et péri-urbain autour du fleuve pour permettre de comprendre son franchissement et visualiser les évolutions sur 500 ans environ. Les villes et le paysage naturel seront donc traitées avec un faible niveau de détail à la différence de l'ouvrage d'art lui-même et de son châtelet de la rive droite.

En s'appuyant sur l'ancienne cartographie, les représentations iconographiques, les études archéologiques, géomorphologiques et bathymétriques le projet proposera une restitution en 3D, évolutive, du paysage fluvial pour les époques les plus anciennes.

Les outils de modélisation 3D du territoire disponibles aujourd'hui sont capables de simuler le paysage à toutes les échelles pour produire une maquette géo-référencée. Ces outils s'appuient sur des couches d'informations géographiques décrivant la cartographie, la topographie et l'altimétrie d'un territoire. Ces informations seront recueillies sous forme de données sources de type cartographiques (raster ou vecteur), d'image de type ortho-photographies géo-référencées et des fichiers de points altimétriques et bathymétriques. Dans le cadre des relevés spécifiques réalisés par l'IGN pour le Plan Rhône, le projet s'appuiera sur le modèle numérique de terrain (MNT) sur la zone d'intérêt. Une étude géographique et historique sera menée sur la zone d'intérêt par le LAMM (UMR 6572) et le CEREGE (UMR 6635) pour « déconstruire » le paysage contemporain et ainsi proposer des restitutions du territoire et du paysage fluvial au moment de la construction du pont Saint-Bénézet.
