

Géoarchéologie du Rhône dans le secteur du pont
Saint-Bénézet (Avignon, Provence, France) au cours
de la seconde moitié du deuxième millénaire apr. J.-C. :
étude croisée de géographie historique
et des paléoenvironnements

*Geoarchaeology of the Rhone River in the area of Pont
Saint-Bénézet (Avignon, Provence, France) during the
second half of the second millennium AD: an integrated
historical geography and palaeoenvironmental study*

Marc-Antoine Vella*, Matthieu Ghilardi*, Ousmane Diouf*, Jean-Claude Parisot*, **,
Daniel Hermitte*, Mireille Provansal*, Jules Fleury*, Philippe Dussouillez*,
Doriane Delanghe-Sabatier*, François Demory*, Yoann Quesnel*, Andreas Hartmann-Virnich***,
Yhann Delpey***, Michel Berthelot****, Andrew Bicket*****

Résumé

Le pont d'Avignon, également appelé pont Saint-Bénézet, fait ici l'objet d'une approche géoarchéologique associant des données issues des études combinées de géographie historique et d'analyse des paléoenvironnements fluviaux rhodaniens. Le but de cet article est 1) de proposer une restitution du tracé du Rhône à l'époque moderne dans le secteur du fort Saint-André (situé à 1 km en amont du pont) et 2) de déterminer l'emplacement des anciennes arches du pont aujourd'hui enfouies sous les alluvions du Rhône ou immergées dans les bras de Villeneuve-lès-Avignon et d'Avignon. Les résultats de l'analyse des cartes anciennes, des relevés bathymétriques et de la caméra acoustique permettent de révéler pour la première fois la présence de blocs de maçonnerie à intervalles réguliers dans les bras de Villeneuve-lès-Avignon et d'Avignon. Une interprétation concernant la forme du pont Saint-Bénézet peut ainsi être proposée et offre une bonne correspondance avec l'iconographie et les cartes établies au cours des XVI^e et XVII^e s. En complément, cinq carottages, d'une profondeur maximale de 7,6 m, ont été réalisés au pied du fort Saint-André, ont permis de restituer la mobilité spatiale du Rhône en amont du pont Saint-Bénézet. La réalisation de datations par le radiocarbone permet de livrer une séquence chronostratigraphique de référence pour le secteur. L'ensemble de ces données géoréférencées a par la suite été intégré dans un Système d'Information Géographique (SIG) afin de restituer l'évolution moderne (XV^e s.-actuel) du Rhône et du pont. La corrélation puis la spatialisation des données de carottages avec celles de la tomographie de résistivité électrique (TRE) attestent la présence d'un bras majeur du Rhône (bras de Villeneuve) au pied du fort Saint-André dès le début du XVI^e s., comme indiqué par l'iconographie et les cartes, et révèle aussi une migration rapide vers l'est dès le XVII^e s. avec un abandon du chenal daté du début du XVIII^e s.

Mots clés : Avignon, paléoenvironnements fluviaux, géoarchéologie, pont Saint-Bénézet, Rhône.

Abstract

Avignon's Bridge, also called Pont Saint-Bénézet, is studied here using a geoarchaeological approach where historical geography methods and palaeoenvironmental proxies are combined for a better understanding of the relationships between the Rhone River evolution and its morphological impacts on the Bridge's use, change and abandonment. The aim of this paper is i) to reconstruct the position of

* Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géoscience et Environnement (CEREGE UMR 7330 CNRS) – Europôle de l'Arbois – BP 80 – 13545 Aix-en-Provence (ghilardi@cerege.fr).

** Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

*** Laboratoire d'Archéologie Médiévale et Moderne en Méditerranée (LA3M UMR 7298 CNRS/AMU Aix-Marseille Université).

**** Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine (MAP UMR 3495 CNRS).

***** Wessex Archaeology Coastal & Marine – 7/9 North Saint David St – Edinburgh, EH2 1AW – Royaume-Uni.

the Rhone River in the area of the Saint-André Fort (situated 1 km northward of the bridge) during Modern times and ii) to propose potential locations of the ancient arches today buried by the Rhone River sediments or found within the two active channels of the River. Results derived from the scrutiny of historical sources (mainly maps), bathymetric survey together with acoustic camera scans of the River's bed clearly reveal the presence of masonry block accumulations at regular intervals within both channels (the Villeneuve-lès-Avignon and Avignon's channels). An interpretation concerning the shape of the Bridge is hereby proposed and is in good accordance with the different drawings and paintings established between the 16th and the 17th c. In addition, 5 boreholes were drilled, to a maximum depth of 7.6 m below the surface, in the western most part of the alluvial plain (Fort Saint-André area) helping to reconstruct the fluvial environments in the vicinity of the Saint-Bénézet Bridge. A chronostratigraphy has been established using a series of 4 radiocarbon dating samples. Historical maps were integrated in a Geographic Information System (GIS) together with a bathymetric survey of the Rhone River and geophysical prospection (Electric Resistivity Tomography – ERT) that allowed a spatial interpretation of the boreholes. The present study highlights major hydrosedimentary changes within the Rhone alluvial plain in the area surrounding the Bridge at Avignon from the 16th to the mid 19th c. Evidence for a gradual shifting of the Rhone River eastwards from the 17th c. is attested and a final disconnection of the Saint-André Fort with the Villeneuve-lès-Avignon channel is observed during the first half of the 18th c.

Key words: Avignon, fluvial palaeoenvironments, geoarchaeology, Rhone River, Saint-Bénézet Bridge.

English abridged version

The city of Avignon is situated 80 km from the distal part of the Rhone Delta (fig. 1) and is located north of the confluence of the Rhone River with the Durance River, one of its main tributaries. The area is of particular interest for both archaeological and geomorphological research. The Saint-Bénézet Bridge, most commonly called Pont d'Avignon, is one of the most famous monuments in France and was built over 8 years between 1177 and 1185, spanning the Rhone River for ca. 920 m. Originally, it established the connection between the Papal city (Avignon) and the Kingdom of France (Philippe-le-Bel Tower, Villeneuve-lès-Avignon) and consisted of twenty two arches. Nowadays, just four remnant arches are still visible on the Avignon side. Careful scrutiny of literary sources reveal that the monument was abandoned ca. 1660-1670 and assumptions concerning the role played by the frequent and violent Rhone River floods during the period of the Little Ice Age (LIA) were made to explain its collapse. A great number of works have been published over the last 30 years which mainly focused on the Rhone River hydromorphological evolution during the Holocene (Provansal *et al.*, 1999; Bruneton *et al.*, 2001; Provansal *et al.*, 2002; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2005; Alline, 2007; Bravard *et al.*, 2008): particular attention has been paid the influence of the LIA on the lateral mobility of the main river course and its tributaries. A clear synthesis has been established for the Durance River (Miramont and Guilbert, 1997) and is well correlated with the Rhone River for reconstructing the frequency and the intensity of the floods for the second millennium AD. Three main phases can be observed: i) the 14th c. and the first decade of the 15th c. are characteristic of important floods where an enlargement of the river beds is observed; ii) the period 1410-1540 is of relative hydrological stability with an important decrease of the flood events; iii) the period 1540-1870, also called the LIA, is characterised by frequent violent floods and an increase of icy episodes (Pichard, 1995); important sediment supply increase and rapid sediment accretion have also been reported for the Rhone delta (Arnaud-Fassetta and Provansal, 1999). Despite the major works conducted on the whole Rhone catchment, few geoarchaeological studies have been conducted in the area to re-

construct the fluvial dynamics and their morphological impacts on the general shape of the Avignon Bridge. The aim of this paper is to integrate historical geography methods, based on the diachronic study of maps and plans, and palaeoenvironmental proxies derived from five boreholes, located just 1 km north of the Philippe-le-Bel Tower (fig. 1 and fig. 4), below the Saint-André Fort. In addition, bathymetric surveys together with acoustic camera measurements have been realised in both channels of the Rhone River in order to reveal their morphology and potential locations of the submerged piles of the Saint-Bénézet Bridge.

Scrutiny of historical maps (tab. 1 and fig. 2) highlights major changes both in the shape of the Avignon Bridge and the evolution of the hydrographical network in the northern area of the Philippe-le-Bel Tower. Difficulties are encountered dealing with the quality and the accuracy presented by diachronic study of the architectural and morphological details. However, the precious information delivered by the analysis of these maps or drawings aids prospection for locating the piles of the Saint-Bénézet Bridge. The bathymetric survey, which was conducted in both channels of the Rhone River at Avignon, mainly focused on the probable sites where blocks of masonry could still be in situ (fig. 3). Acoustic camera prospection was coupled with the bathymetric survey and revealed the presence of stonework features on the bed of both channels of the Rhone River, some of them are 1.5 m high and show angular shapes. Some remnant piles were identified and precisely mapped and superimposed on the georeferenced historical maps (fig. 5), indicating a perfect correspondence, which facilitated the reconstruction of the number and the span of the arches. To complement this study of historical geography, a palaeoenvironmental reconstruction of the Rhone River evolution was also undertaken.

The borehole stratigraphy, derived from 4 of the 5 cores, is based on LASER grain-size analyses and magnetic susceptibility measurements of 352 samples; in addition, a series of 4 AMS radiocarbon dates enables a chronostratigraphy (tab. 2 and tab. 3). Fig. 6 shows the core profiles together with all laboratory results. 7 main sedimentary units (SU) can be identified and summarised as follows:

- SU1 is found in the lowermost part of cores Vill 1, Vill 2 and Vill 3 (fig. 6) and is composed of very coarse material,

mainly gravels and pebbles (typically fragments of granite and limestone) and cannot be dated since no organic matter has been found.

- SU2 directly overlies the pebbles corresponding to SU1 and shows very low magnetic susceptibility values, ranging between 15 and 20 x 10⁻⁸ m³/kg, mean grain size ranges from 160 and 220 µm for cores Vill 1 et Vill 3 and from 220 to 260 µm for Vill 2.

- SU3 is generally coarser than SU2 and is characterised by a mean grain size ranging from 260 and 420 µm; some gravels are also observed. The magnetic susceptibility values range from 15 and 20 x 10⁻⁸ m³/kg and the frequency dependence (Fd) indicates very high values (>10%). A detrital origin of the magnetic signal can be assumed since there is no increase of the magnetic susceptibility signal together with the Fd.

- SU4 is about 0.90 m thick and is composed of medium to coarse sand (mean grain size ranges from 260 to 420 µm). Magnetic susceptibility values are generally comprised from 15 to 24 x 10⁻⁸ m³/kg where peaks are recorded on Vill 1 (177 x 10⁻⁸ m³/kg at 3.97 m deep). Fd does not record meaningful values.

- SU5 is about 0.72 to 1.65 m thick. Mean grain size is decreasing towards the uppermost part of the strata with values ranging from 250 to 100 µm. Occasionally, some peaks are observed for the modal index (260 µm). Magnetic susceptibility signal is low (15-20 x 10⁻⁸ m³/kg). However, core Vill 1 records high values, ca. 85 x 10⁻⁸ m³/kg in a depth of ca. 3 m below the surface. It is obvious that the river transport capacity is decreasing and the material deposited is finer (fine to medium sand). Two radiocarbon dates have been performed on charcoal fragments (tab. 3) situated in the lowermost part of SU5 of core Vill 3, and ages are ranging from AD 1421-1615 (430 ± 30 BP) to AD 1492-1662 (290 ± 30 BP). In addition, a sample of organic matter sampled in the uppermost part of SU5 indicates an age of AD 1681-1896 (120 ± 25 BP).

- SU6 is 0.4 to 0.8 m thick and is composed of fine material, mainly silty clay. Modal index indicates values mainly ranging from 40 to 60 µm and the fraction below 63.4 µm is almost 100% along the sequence. Magnetic susceptibility values are low and a radiocarbon dating performed on a charcoal sample situated in the central part of SU6 of core Vill 4 (tab. 3) reveals an age of AD 1646-1808 (205 ± 30 BP). This unit drastically contrasts with SU 2 to SU 5 in terms of river transport capacity and the transition from SU5 to SU6 is not abrupt, which could indicate a migration of the main river channel.

- SU7 is 0.8 to 1.4 m thick and is composed of recent silt and clay (modal and mean indexes are comprised between 40 and 60 µm). Magnetic susceptibility measurements reveal a slight increase towards the present-day surface and this phenomenon can be attributed to pedogenic processes. Fd is close to 9% and reveals a high contribution from superparamagnetic grains.

Results derived from the geoelectrical method of Electric Resistivity Tomography (ERT; fig. 7) indicate three main geoelectrical units (GU) that can be described as follows:

- GUa is only found on AVI 05 profile (fig. 7A) where from ca. 16 to 32 m below the surface resistivity values range between 50 and 150 Ω.m. Since the boreholes did not reach such depth, it is difficult to confirm the type of material. Nevertheless, the Infoterre drillholes database indicates the presence of a karstified limestone substratum (no. 09406XO280, ref. BRGM). We can infer that the first geoelectrical unit corresponds to the Barremian bedrock highly affected by fissures.

- GUb, identified for AVI 05 and AVI 07 ERT profiles (fig. 7), shows the highest values, ranging from 140 and 300 Ω.m, and is found from ca. 4 to 16 m below the surface. The uppermost part of the unit locally shows feature of incision and can be correlated with the boreholes stratigraphy. Sedimentological results indicate the presence of very coarse material composed of well-rounded pebbles and gravels. GUb can be linked with SU1 (fig. 6).

- GUc is found between the present day surface topography and 4 to 7 m in depth with resistivity values comprised from 4 and 100 Ω.m with strong decrease towards the top. High conductivity is generally observed where particular low values of resistivity observed close to the foothill of the Saint-André Fort with signal less than 30 Ω.m. Linking the ERT results with the general boreholes stratigraphy, we observe that sediment are generally composed of medium to coarse sands from ca. 6-7 m to 2 m in depth and from 2 m to the surface; there is mainly silty clay highly saturated by the presence of the water table. GUc corresponds to SU2 to SU5 (resistivity values comprised between 30 and 100 Ω.m) for its lowermost part (GUc1), and to SU6 and SU7 for its uppermost part (GUc2) where resistivity values are comprised between 4 and 70 Ω.m.

All the results described above help to propose locations for the missing piles of the Saint-Bénézet Bridge, which are now buried by sediments (Barthelasse Island) or submerged within the Villeneuve-lès-Avignon and Avignon's channels of the Rhone River. Fig. 8 indicates the proposed location of the piles (tab. 4), based on the integration of historical maps and bathymetric survey together with acoustic camera investigations. The first inference from the results is that the shape of the Saint-Bénézet Bridge is more complex than expected and reveals at least five different orientations of the bridge, with an important rotation from the Barthelasse Island towards the Philippe-le-Bel Tower. The orientation changes could be explained by the influence of the hydromorphological evolution of the Villeneuve-lès-Avignon channel during the LIA on the architecture of the bridge. The construction of a chronostratigraphic sequence helps to reconstruct the Rhone channels evolution from the mid 15th c. to the end of the 17th / beginning of the 18th c. It is obvious that an important sediment accumulation occurred during the 16th and the 17th c. below the Saint-André Fort; a previous course of the Villeneuve-lès-Avignon channel. Sedimentological data indicates a shifting of the Rhone course with strong decrease of the river transport capacity that can be dated from the end of the 17th c. Maps dated from 1685 and 1776 reinforce the idea of the migration of the river towards the east. Swamps developed directly below the Saint-André Fort until the second half of the 17th c. (fig. 9). Relationships between the general hydroclimatic context

(LIA) and the high frequency of violent floods are attributed to the mid 17th c. (Pichard, 1995). The final abandonment of the Pont Saint-Bénézet is dated to ca. 1660-1670 and could be linked with these natural parameters and strong lateral mobility of the Rhone River channels associated with a high recurrence of floods.

Introduction

La ville d'Avignon est localisée à 80 km de l'embouchure du Rhône (fig. 1A). Elle se situe en amont du delta de ce dernier et au nord de la confluence du Rhône avec la Durance, l'un de ses principaux affluents de rive gauche. Le relief calcaire qui forme le Rocher des Doms (fig. 1A) atteste une occupation humaine quasi continue depuis le Néolithique (Carru, 1999) jusqu'à la période actuelle. Tour à tour capitale celto-ligure (aux environs du Ve s. av. J.-C.) puis comptoir phocéén sous le nom d'*Aoye* (d'après Etienne de Byzance dans *Ethniques*), la cité romaine d'*Avenio* témoigne d'une occupation florissante, construite à partir du Rocher des Doms et descendant vers le sud le long du Rhône (Bruneton, 1999 ; Carru, 1999). Le site d'Avignon et le Rhône ont ainsi une histoire commune plurimillénaire comme en atteste l'étymologie d'Avignon qui signifierait « Seigneur du fleuve » en ligure (Carru, 1999 ; Rossiaud, 2007). Le pont Saint-Bénézet, plus communément appelé pont d'Avignon, est devenu puis resté célèbre dans la tradition populaire mais suscite encore des questions archéologiques et architecturales. Premier ouvrage permanent édifié sur le Rhône (ou connu comme tel) entre Vienne et la mer au cours du Moyen-Âge, il n'aurait été en fonction que durant environ cinq siècles. Son proche voisin, à pont Saint-Esprit (fig. 1A), livré 124 ans après celui d'Avignon à 43 km en amont, est encore utilisé de nos jours, sept siècles après son achèvement.

Le pont d'Avignon, construit en seulement 8 ans, entre 1177 et 1185 d'après les sources hagiographiques (Marié, 1953 ; Marmottan, 1964), comportait vraisemblablement entre 17 et 24 arches dans son dernier état connu, pour une longueur approximative de 920 m (Marié, 1953 ; Marmottan, 1964). Au cours de son histoire, l'ouvrage a connu de très nombreuses destructions et le franchissement du Rhône à cet endroit a été pendant longtemps assuré par une combinaison de passerelles de bois, d'arches en pierre et de bacs, dès qu'une ou plusieurs sections étaient emportées par les crues du fleuve (Delahaye, 2004). Les aménagements modernes du fleuve achevés en 1973 par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) ont aujourd'hui figé le paysage fluvial. Les aménagements agricoles et urbains ont contribué à faire disparaître tout indice morphologique de l'évolution hydro-sédimentaire du Rhône dans ce secteur, très riche d'un point de vue archéologique et affecté par une forte mobilité hydrographique comme le montre l'étude des cartes anciennes.

Les études paléoenvironnementales menées sur l'évolution de la morphologie fluviale du Rhône sont nombreuses. Certaines concernent l'ensemble du linéaire (Bravard *et al.*, 2008 ; Bravard, 2010 ; Bravard et Provansal, 2011). La plupart se sont essentiellement concentrées sur les secteurs situés en amont (Berger, 1996 ; Bravard, 2004 ; Salvador *et*

al., 2005 ; Reynard *et al.*, 2009) et en aval du pont d'Avignon (Provansal *et al.*, 1999 ; Arnaud-Fassetta, 2000 ; Provansal *et al.*, 2002 ; Antonelli *et al.*, 2004a ; Arnaud-Fassetta, 2004 ; Vella *et al.*, 2005 ; Mailliet *et al.*, 2007 ; Provansal *et al.*, 2010). Ces travaux ont permis de retracer les grandes phases de la morphogenèse holocène de la vallée du Rhône, en caractérisant notamment la période du Petit Âge Glaciaire (PAG) comme une période de forte instabilité du système fluvial, liée aux crues fréquentes et à d'importants apports sédimentaires dans le bas Rhône jusqu'au delta (Arnaud-Fassetta et Provansal, 1999 ; Bravard *et al.*, 2008 ; Bravard et Provansal, 2011). L'étude historique du rythme des crues médiévales (Pichard, 1995) et des épisodes d'embâcle/débâcle (Jorda et Roditis, 1994) du Rhône montrent d'ailleurs des variations de fréquence au cours du temps en accord avec les tendances que d'autres marqueurs du climat ont mis en évidence (Leroy-Ladurie, 1983 ; Carozza *et al.*, 2011). Ainsi, les périodes 1550-1620 et 1740-1850 sont fortement marquées par une augmentation de la fréquence des crues et des épisodes d'embâcles/débâcles sur le Rhône au cours du PAG (Pichard, 1995). De pareilles observations hydrologiques ont également été relevées sur la Durance (Miramont et Guilbert, 1997) où le XIV^e s. et les premières années du XV^e s., en particulier la décennie 1350-1360, sont marquées par des épisodes de crue fréquents associées à un élargissement du lit. La période 1410-1540 est caractérisée par une baisse très importante de la fréquence et de la hauteur des crues et est sans doute associée à une contraction des lits de la rivière. Enfin, la période 1540-1870 voit la fréquence des crues exceptionnelles augmenter très sensiblement, en particulier pendant les courtes crises hydrologiques de 1540-1590 et de 1630-1690.

L'absence de données géoarchéologiques au niveau du pont d'Avignon a récemment motivé la collaboration entre différents laboratoires du CNRS où une part prépondérante a été accordée à l'étude des relations entre les phases de destruction/reconstruction et enfin d'abandon de l'ouvrage en lien avec l'histoire fluviale. Afin de mener à bien cette étude pluridisciplinaire regroupant architectes, archéologues, historiens et géographes-géomorphologues, une approche de géographie historique a été privilégiée en parallèle à l'analyse paléoenvironnementale de carottages dont le but est de restituer la mobilité du bras de Villeneuve-lès-Avignon (fig. 1) aux abords de l'ouvrage d'art, au cours de la seconde moitié du deuxième millénaire après J.-C. En complément à une approche classique de géographie historique qui permet d'apprécier les grands traits de l'évolution du réseau hydrographique, qui a notamment fait ses preuves sur les affluents de rive droite du Rhône (Jacob-Rousseau, 2010), les données issues des carottages corrélées aux profils géoélectriques ont permis de spatialiser la mobilité des chenaux au cours de la période de fonctionnement du pont et de mettre en évidence des périodes d'accumulation et/ou d'érosion dans la plaine alluviale. Cette approche méthodologique est novatrice dans le secteur d'Avignon mais a déjà fait ses preuves sur d'autres fleuves (Loire : Burnouf et Leveau, 2004 ; Rhin : Alkema et Middelkoop, 2007 ; Hoffmann *et al.*, 2009 ; Tamise : Brown, 1997 ; Tibre : Salomon *et al.*, 2010). Elle permet d'identifier

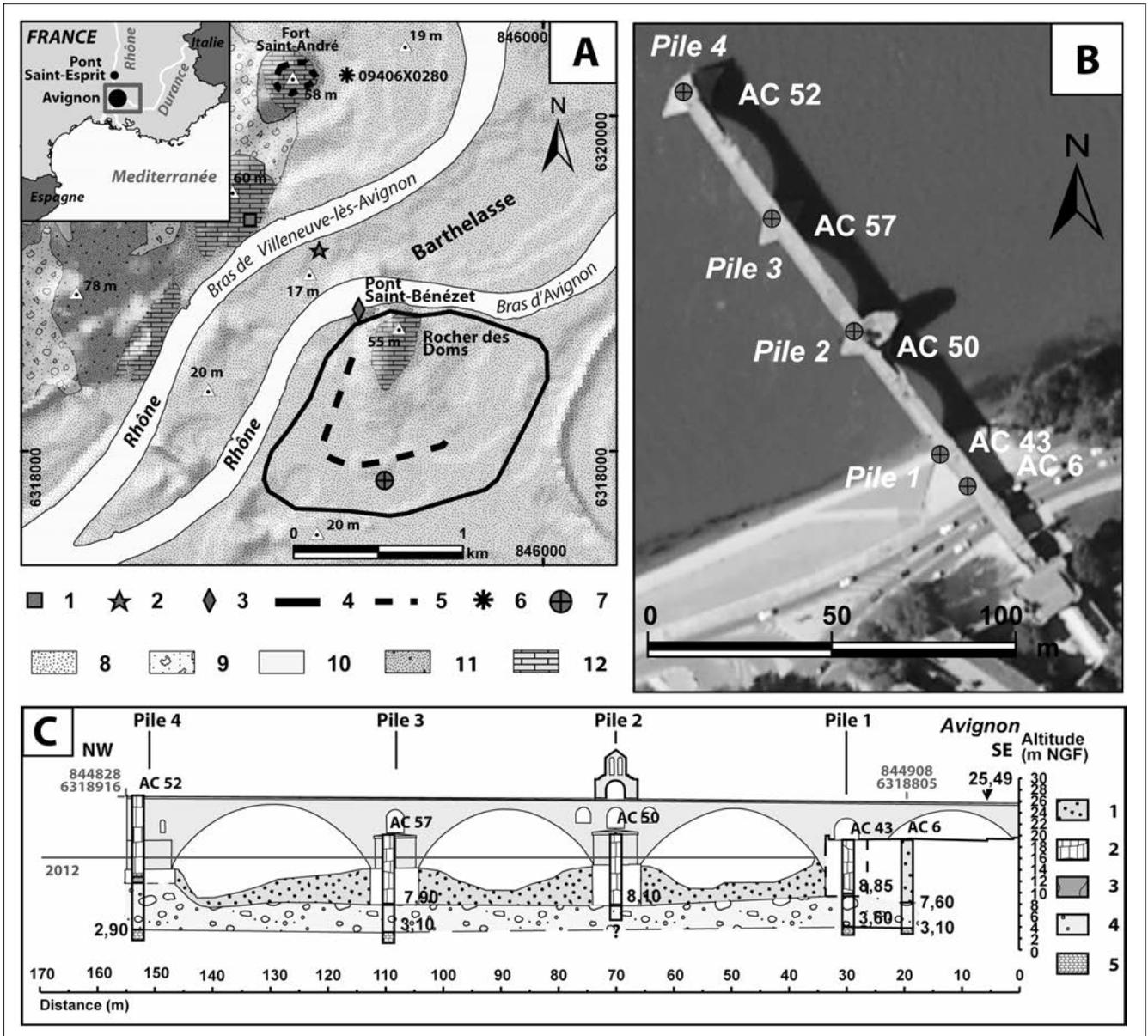


Fig. 1 – Localisation de la zone d'étude et morphologie actuelle du pont Saint-Bénézet. A : Contexte général. 1 : tour Philippe-le-Bel (partie terminale du pont rive droite) ; 2 : pile restante du pont Saint-Bénézet ; 3 : pont Saint-Bénézet ; 4 : remparts du XIV^e s. ; 5 : remparts du début du Moyen Âge ; 6 : sondages géologiques de la base de données BSS ; 7 : sondages archéologiques préexistants ; 8 : plaine alluviale holocène ; 9 : colluvions quaternaires ; 10 : terrasse alluviale (Villafranchien) ; 11 : grès et sables (Miocène) ; 12 : calcaires (Barrémien). B : Orthophotographie du pont Saint-Bénézet (BD ORTHO © IGN PFAR 2000) et emplacement des sondages CNR (1965-66). C : Profil en long des quatre arches restantes et nature des sédiments à la base des piles (données CNR, 1965-66). 1 : sables ; 2 : maçonnerie des piles du pont Saint-Bénézet ; 3 : éléments en bois du pont Saint-Bénézet ; 4 : galets ; 5 : calcaires (Barrémien).

Fig. 1 – Location of the study area and actual shape of the Saint-Bénézet Bridge. A: General framework. 1: Philippe-le-Bel Tower (end of the Avignon's Bridge in its western part); 2: remnant pile of the Saint-Bénézet Bridge; 3: Saint-Bénézet Bridge; 4: walls of the 14th century; 5: early Mediaeval walls; 6: location of the Infoterre Geological drillholes database; 7: pre-existing archaeological excavations; 8: Holocene alluvial plain; 9: Quaternary colluviums; 10: alluvial terrace (Villafranchian); 11: sandstone and sand (Miocene); 12: limestone (Barremian); B: Orthophotography of the Saint-Bénézet Bridge (BD ORTHO © IGN PFAR 2000) and location of the drillholes done by the CNR (CNR, 1965-66). C: Present shape of the Saint-Bénézet Bridge and type of sediments situated at the foot of the piles; 1: sand; 2: masonry of the Saint-Bénézet Bridge piles; 3: wood elements of the masonry; 4: pebbles; 5: limestone (Barremian).

les facteurs de contrôle des changements morpho-sédimentaires observés sur un grand organisme fluvial, en particulier le rôle d'un important ouvrage d'art. Cet article complète ainsi les recherches déjà réalisées sur le bas Rhône, dans lesquelles le PAG restait encore mal connu.

Contextes géologique et géomorphologique

Avignon est située dans la partie aval de la moyenne vallée du Rhône. Cette zone géographique est caractérisée par une

succession d'éperons rocheux calcaires contraignant le fleuve à réduire sa plaine d'inondation, qui mesure ici moins d'un kilomètre de large (fig. 1A). La réduction de la pente du profil en long a favorisé le développement d'une anabranchie, stabilisée depuis le milieu du XIX^e s., caractérisée par de grandes îles boisées (la Barthelasse en particulier). Les études paléoenvironnementales, paléohydrologiques et archéologiques menées récemment sur l'évolution holocène de la plaine alluviale entre Arles et Avignon (Provansal *et al.*, 1999 ; Bruneton *et al.*, 2001 ; Provansal *et al.*, 2002 ; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2005 ; Alline, 2007 ; Bravard *et al.*, 2008) montrent que sa morphologie est le résultat d'une évolution complexe rythmée par des phases d'accumulation/mobilité latérale et d'incision/stabilité. Pendant la période antique, la rive gauche du Rhône à Avignon se situait à l'est de sa position actuelle (Carru, 1999). A Arles, le plancher alluvial était plus bas qu'actuellement (Bruneton *et al.*, 2001). Cette époque est suivie d'une crise hydrologique majeure à l'échelle du bassin-versant du Rhône au cours de l'Antiquité tardive et du Haut Moyen Âge (V^e-VII^e s. apr. J.-C. ; Arnaud-Fassetta, 2004 ; Salvador *et al.*, 2005 ; Alline, 2007). Les écoulements et la charge solide plus grossière augmentent et conduisent le fleuve à adopter un style en tresses, dont les traces sont perçues sur le Rhône amont et moyen (Bravard *et al.*, 2008) ou à devenir fortement instable latéralement comme dans la traversée d'Arles (Bruneton *et al.*, 2001). Une étude récente a émis l'hypothèse que les îles en amont d'Avignon seraient probablement héritées de cette période (Bravard *et al.*, 2008). S'ensuit une période caractérisée par un déficit hydrologique et un niveau bas des lacs d'altitude au cours de l'Anomalie Climatique Médiévale (ACM, ~750-1000 apr. J.-C. ; Arnaud *et al.*, 2005). Au cours de cette période, les cours d'eaux incisent leur plaine alluviale et réduisent le nombre de chenaux actifs (Carozza *et al.*, 2011) mais le Rhône aval n'en a pas fourni d'indice.

Les études sur les premières destructions historiques dues à une augmentation de la fréquence et/ou de l'amplitude des crues et des phénomènes d'embâcle et de débâcle sur le Rhône montrent que plusieurs épisodes d'une ampleur qualifiée d'exceptionnelle sont enregistrés à partir de 1100 apr. J.-C. (Rosiaud, 2007). Cependant, les témoignages d'épisodes de crues restent exceptionnels avant 1330. Le XIV^e s. et les premières années du XV^e s. se distinguent comme une période au cours de laquelle la fréquence des événements a été particulièrement importante (Pichard, 1995 ; Miramont et Guilbert, 1997). Ces périodes, comparables à celles documentées sur les rivières des Alpes du Nord (Bravard, 1989 ; Salvador, 1991 ; Landon, 1999 ; Bravard *et al.*, 2008) sont suivies par une diminution de la fréquence des crues entre 1410 et 1540, témoignant d'un certain apaisement hydrologique (Pichard, 1995 ; Miramont et Guilbert, 1997). Le renforcement de la compétence du flux au cours du PAG (XIV^e-XIX^e s.) est confirmé, avec moins de précisions chronologiques, par les dépôts alluviaux qui se déposent hors des murs d'Avignon (Bruneton, 1999). Depuis 1500, la fréquence des crues présente deux maxima, 1560-1600, puis 1670-1710 (Leroy-Ladurie, 1983 ; Jorda et Reditis, 1994 ; Pichard, 1995). Sur le Rhône amont et moyen, la translation amont-aval de la charge de fond (et la métamorphose fluviale qui l'accompagne) sont progressifs (Bravard, 2010 ; Salvador

et al., 2005) et qu'un délai de deux à trois siècles a été nécessaire avant que ne transite la charge de fond et ne fasse évoluer la morphologie de la plaine alluviale. L'influence des sociétés humaines sur les hydrosystèmes, croissante tout au long du Moyen Âge et des Temps Modernes, puis exponentielle depuis l'ère industrielle, a interféré à plusieurs reprises avec l'influence des événements climatiques (Jacob-Rousseau, 2010). Ces fluctuations centennales de l'intensité des phénomènes hydrologiques au sein du PAG ont été étudiées précisément dans le delta (Arnaud-Fassetta, 2000), mais sur Avignon, elles ne sont pas encore clairement identifiées du point de vue des études paléoenvironnementales.

Les principales formations sédimentaires qui composent la plaine alluviale dans le secteur d'Avignon ont fait l'objet de recherches lors de travaux hydrogéologiques. Ces données ont été reportées dans la base de données Infoterre développée par le BRGM. Les forages réalisés par la CNR (1965-1966) sur les piles du pont Saint-Bénézet (AC 52, AC 57, AC 50, AC 43, AC 6 ; fig. 1B et C) montrent clairement la présence des calcaires barrémiens à une altitude comprise entre 2,9 et 3,6 m NGF (CNR, 1965). Au-dessus, les piles du pont s'implantent directement sur une nappe de galets. Les dépôts superficiels sont principalement composés de sables mais aucune analyse sédimentologique n'a été réalisée sur ces forages et leur caractérisation granulométrique demeure imprécise. Les travaux que nous présentons ici tentent d'apporter de plus amples informations sur la morphologie de la plaine alluviale au cours de la période d'utilisation du pont (1185-1670). Les travaux d'aménagement des Ponts et Chaussées (1870-1880) puis de la CNR (1970-1973) ont profondément modifié la morphologie de la plaine alluviale au niveau d'Avignon et les zones potentielles d'étude paléoenvironnementale sont limitées au seul secteur de la plaine du fort Saint-André de Villeneuve-lès-Avignon (secteur Labadie sud). Le forage (n° 09406XO280, réf. BRGM) permet de mettre en évidence la stratigraphie de ce secteur de la plaine alluviale. Elle est composée, de haut en bas, de « terre argileuse » sur 1,5 m, puis de 4,5 m de sables argileux et, enfin, d'une nappe de débris grossiers sur 6 m d'épaisseur. Le substrat calcaire est atteint à une profondeur de 12,5 m, soit à environ 3,5 m NGF. Bien que cette stratigraphie puisse nous renseigner sur les grandes tendances hydrosédimentaires du Rhône dans le secteur d'Avignon, elle est en revanche insuffisante pour approcher les évolutions du PAG.

C'est pour cette raison que les études que nous avons menées dans la plaine alluviale se sont concentrées en rive droite du Rhône, où les aménagements ont été moins importants, et nous ont permis de restituer les paysages fluviaux avant le XIX^e s. L'île de la Barthelasse a fait l'objet de travaux particulièrement importants compte tenu de sa position centrale dans le lit mineur et de sa vulnérabilité face aux crues.

Etudes préliminaires des caractéristiques architecturales du pont d'Avignon

Du pont proprement dit (hors châtelets), il ne reste plus en rive gauche que quatre arches très fortement modifiées par

les restaurations du XIX^e s. et des vestiges très ténus d'une pile sur l'Île de la Barthelasse. La tour Philippe-le-Bel, du côté de Villeneuve-lès-Avignon, en rive droite (fig. 1A), jouxtait, surveillait et protégeait l'accès au pont. Les travaux d'aménagement de la plaine alluviale, à hauteur de l'ancienne cité papale, ont été particulièrement importants dans la zone du pont Saint-Bénézet. La chapelle de style roman tardif (Rouquette, 1974) construite sur la seconde pile (fig. 1C) est datée de la fin du XII^e s. (Sagnier, 1883 ; Marié, 1953). C'est un marqueur, le seul qui soit parvenu jusqu'à nous, de l'évolution architecturale de l'ouvrage d'art.

Dans son premier état, la chapelle se présente comme un seul volume composé d'une nef d'une seule travée et d'une abside désaxée vers le sud-est. Son sol originel, retrouvé au XIX^e s. à plus d'un demi-mètre en dessous du sol actuel, suggère un rapport avec le tablier très bas d'un pont charpenté, imaginé déjà par les études anciennes (Marié, 1953 ; Patry, 1966 ; Rouquette, 1974), dont il est toutefois impossible de restituer la forme, la position exacte et la structure.

Les recherches d'archéologie du bâti conduites dans le cadre du programme ANR PAVAGE démontrent que le niveau d'accès à la chapelle fut déjà exhaussé dès l'achèvement de la construction originelle, avant de la diviser par l'insertion, vers le premier tiers du XIII^e s., d'une voûte sur croisée d'ogives intermédiaire. Ainsi séparée du nouvel étage, la chapelle inférieure, qui dut rester visible d'en haut, était probablement réservée à la vénération des reliques du saint fondateur. Le sol de la chapelle supérieure était sans doute aligné sur le niveau du tablier d'un nouveau pont, qui dut précéder les arches actuelles et dont la date n'est probablement pas antérieure au XIV^e s.

Plus énigmatiques, car difficilement compatibles avec la chapelle, restent les amorces d'anciennes arches plus élancées sous le niveau actuel du fleuve, incorporées dans la base de la pile et situées à l'aplomb de la courte nef. Il est toutefois impossible d'en restituer la forme, la position exacte et la structure.

Peu avant l'achèvement de la chapelle, donc très rapidement, le projet semble avoir évolué et la construction d'une voûte pour diviser la chapelle en deux niveaux, accompagnée du prolongement de la nef inférieure d'au moins une travée en dessous du niveau du nouveau tablier, s'inscrit sans doute dans le programme d'une reconstruction du pont en maçonnerie, réalisée probablement à partir de 1234-1237, date historique compatible avec le style des colonnettes et des ogives. L'étroitesse du cheminement actuel (environ 1,5 m) pose la question d'une modification de la trajectoire des arches de cette époque, ou plus sûrement de la disparition d'un contournement s'appuyant sur l'arrière-bec qui figure effectivement dans l'iconographie de l'époque moderne. Difficilement compatibles avec la chapelle, les amorces d'anciennes arches sont plus élancées mais non visibles aujourd'hui car sous le niveau ordinaire actuel du fleuve (autour de 15,8 m NGF). L'ajout d'une abside supérieure en 1513, incorporées dans la base de la pile, et un remaniement de la façade dans le style du gothique flamboyant témoignent de l'intérêt pour le pont et sa chapelle au début de l'époque moderne (Breton, 1987).

Véritable prouesse architecturale de l'époque, le pont Saint-Bénézet assurait ainsi le passage des voyageurs, marchands

et pèlerins à un carrefour entre de grands axes routiers et commerciaux pendant près de 500 ans, entre la fin du XII^e s. et la fin du XVII^e s. (1660 à 1670). C'était aussi un chantier permanent qui nécessitait un investissement financier important et régulier puisqu'à chaque crue du Rhône, des arbres déracinés endommageaient les piles (Delahaye, 2004).

Méthodes d'étude

Dans cette étude, nous avons adopté une approche interdisciplinaire où les sources cartographiques de la fin du XVII^e s. ont été croisées avec les données issues de l'étude paléoenvironnementale de la plaine. Ainsi, de nouvelles données issues de l'analyse sédimentologique de carottages et de profils de résistivité électrique (TRE) ont été acquises et nous ont permis non seulement de restituer la dynamique fluviale du Rhône et son tracé mais aussi de reconstituer la localisation des ruines probables des piles du pont entre le XVI^e et le XIX^e s.

Géographie historique

Dans le but de localiser les ruines des piles du pont, nous avons rassemblé des plans, des cartes et des illustrations d'artistes et d'ingénieurs contemporains et postérieurs au fonctionnement du pont (fig. 2). Si l'aspect esthétique peut parfois prendre le pas sur l'information géographique, il ne faut néanmoins pas renier le caractère informatif de tels documents. Sur les 23 documents rassemblés dans le cadre de cette étude, 8 d'entre eux ont particulièrement retenu l'attention en raison de la haute qualité graphique et du souci du détail (forme des arches, emplacement de la chapelle sur la deuxième pile du pont, etc.) et ont ainsi été utilisées pour identifier des formes alluviales au sein du lit majeur (tab. 1 et fig. 2). Cette base de données de sources anciennes nous a également permis de repérer les formes fluviales représentées. Chacun des documents a été numérisé afin de permettre leur intégration dans un SIG. La projection cartographique utilisée pour toutes les données et la réalisation des cartes présentées est le Lambert 93 RGF93. Cependant, les documents les plus anciens ne comportent pas d'éléments géographiques qui permettent un géoréférencement précis. Nous avons par conséquent utilisé un minimum de 15 points d'amer sur des éléments de construction (édifices remarquables tels que des angles de tours de garde, de bâtiments, etc.) encore présents à l'heure actuelle pour rectifier leur position géographique. Un modèle de transformation polynomial a ensuite été utilisé pour le redressement des documents. Il est implicite que les zones avec peu de contraintes de localisation, *i.e.* les zones naturelles, sont géoréférencées de façon plus imprécise. L'étude diachronique des documents cartographiques atteste une certaine continuité dans la morphologie du pont mais des incertitudes subsistent concernant le nombre de piles et leur position au sein du bras de Villeneuve. Certaines des représentations de l'ouvrage montrent aussi un raccourcissement des arches dont la localisation n'a pu être déterminée avec précision. Concernant l'évolution morphologique de la plaine alluviale, l'analyse diachronique des

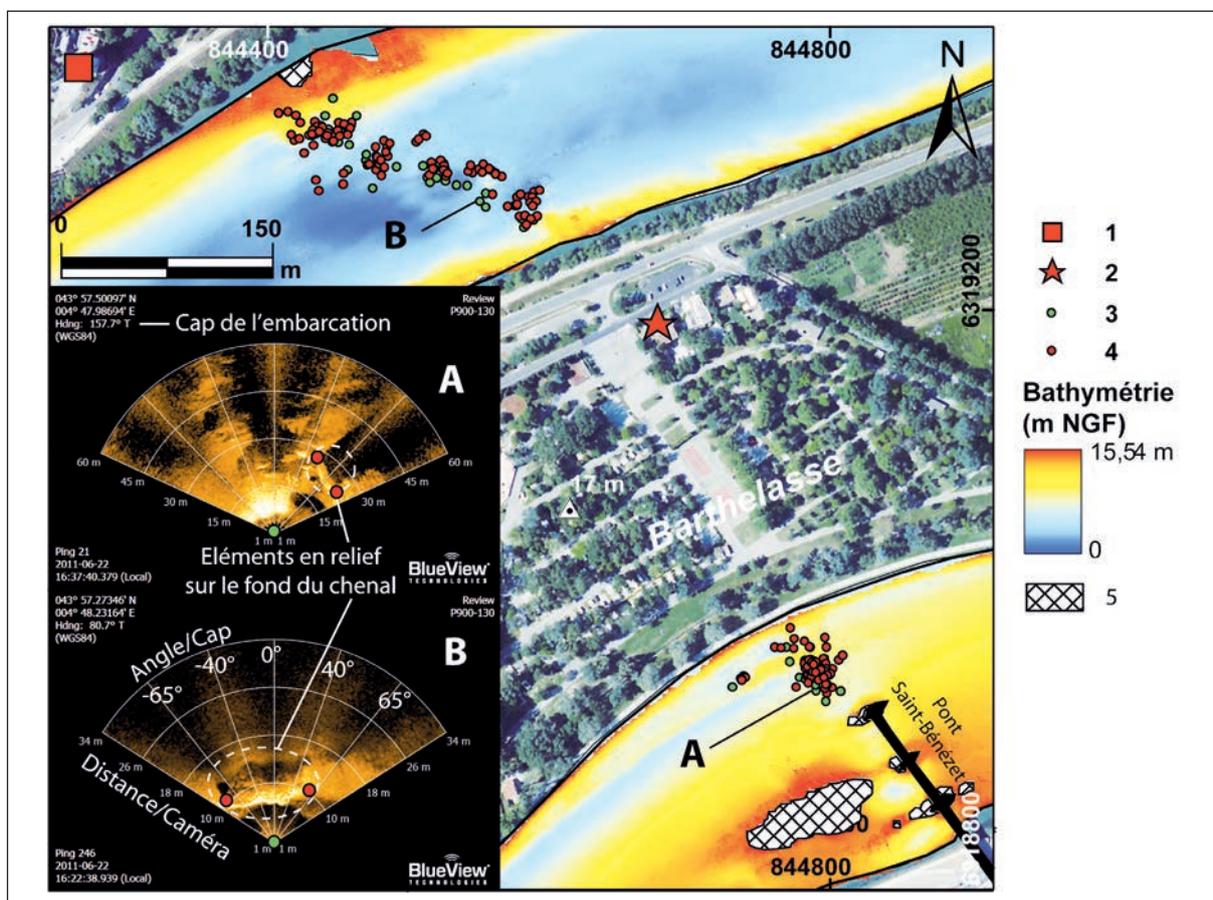
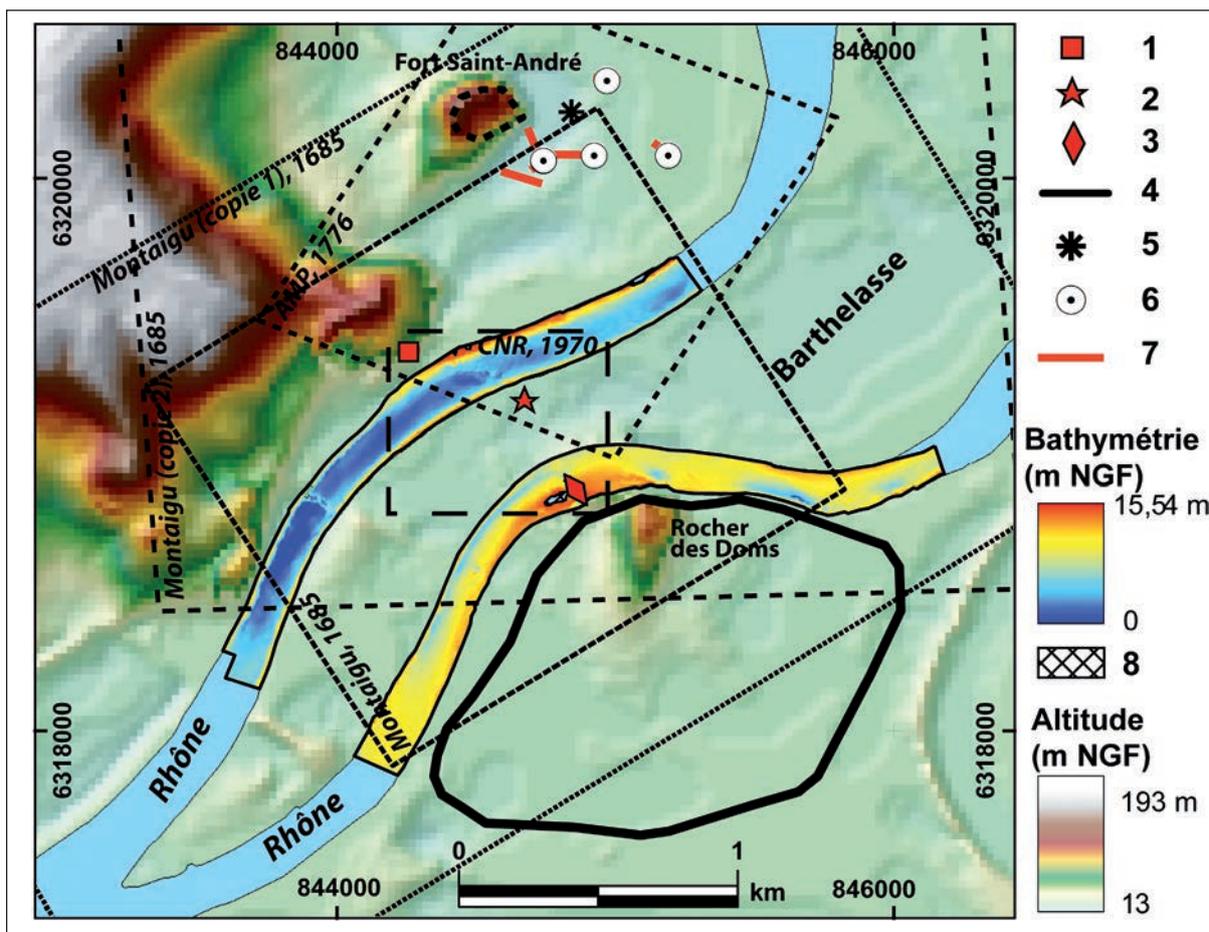


Fig. 2 – **Etendue géographique des documents cartographiques anciens utilisés et topo-bathymétrie de la zone réalisée en 2012.** 1 : tour Philippe-le-Bel ; 2 : pile restante du pont Saint-Bénézet ; 3 : pont Saint-Bénézet ; 4 : remparts du XIV^e s ; 5 : sondages géologiques de la base de données BSS ; 6 : carottages réalisés dans le cadre de cette étude ; 7 : profils TRE ; 8 : absence de données bathymétriques.

Fig. 2 – **Spatial extent of the ancient cartographical documents employed and topo-bathymetry of the area (2012).** 1: Philippe-le-Bel tower; 2: remnant pile of the Saint-Bénézet Bridge; 3: Saint-Bénézet Bridge; 4: walls of the 14th century; 5: location of the Infoterre Geological drillholes database; 6: boreholes drilled within the framework of the present article; 7: ERT profiles; 8: no bathymetric data.

Nom	Type de document	Date	Auteur	Description	Lieu de conservation
Avenio Urbis Antiqua	Carte	1580-1583	Ignazio Danti	Peinture murale du Comtat Venaissin et un carton représentant le secteur d'Avignon	Galerie du Vatican
Plan du pont d'Avignon	Carte	Vers 1685	Inconnu	Carte inachevée en couleur du Rhône à Avignon	BNF Richelieu
Plan Montaigu	Carte	1685	Ingénieur Montaigu	Carte du Rhône à Avignon décrivant les projets d'aménagement hydraulique sur le bras de Villeneuve	Archives nationales
Plan de Villeneuve-lès-Avignon, du fort Saint-André et de la Tour du pont	Gravure	1695	Anonyme	Gravure représentant le Rhône entre Avignon et Villeneuve-lès-Avignon	BNF Richelieu
Villeneuve-lez-Avignon	Carte	1776	Anonyme	Plan couleur commandé par la Société Royale de médecine suite à une vague de paludisme à Avignon	Académie de Médecine de Paris (AMP)
Carte topographique du cours du Rhône	Carte	1840-1856	Ponts et Chaussées (Service Spécial du Rhône)		BNF Richelieu
Mission Alliée	Photos aériennes	1942	Forces Alliées		Grand Avignon
Plan de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR)	Plan	1965-1970	CNR	Plan représentant les restes de piles du Pont Saint-Bénézet dans le bras de Villeneuve-lès-Avignon	CNR
Institut Géographique National (IGN)	Photos aériennes	2010	IGN		IGN

Tab. 1 – **Liste des documents cartographiques utilisés.**

Tab. 1 – *Inventory of cartographic sources.*

cartes et plans anciens indique que différents environnements fluviaux ont existé au cours de la période de fonctionnement du pont. Afin de savoir si cette diversité provient d'un effet de recherche artistique, de recopiage ou d'une réalité géomorphologique, nous avons, pour chacun des documents, porté notre attention sur la morphologie du fleuve et la limite de ses berges. Chacune des informations a ensuite été vectorisée à partir des documents géoréférencés.

Bathymétrie des chenaux du Rhône et caméra acoustique

Les cartes et documents historiques que nous avons utilisés permettent de restituer en partie la localisation des piles du pont mais leur situation et leur état de conservation actuels dans les bras d'Avignon et de Villeneuve restent très incertains. Afin de positionner puis identifier les éléments de construction encore présents, nous avons réalisé une prospection bathymétrique (sonar multifaisceaux) à l'endroit présumé du tracé du pont en nous fondant sur les sources cartographiques d'époque moderne (XV^e s.-actuel ;

Fig. 3 – **Bathymétrie à très haute résolution et images de la caméra acoustique.** 1 : tour Philippe-le-Bel ; 2 : pile restante du pont Saint-Bénézet ; 3 : position de la caméra acoustique ; 4 : positions des structures identifiées grâce à la caméra acoustique ; 5 : absence de données bathymétriques. A et B : captures d'écran issues des données de la caméra acoustique.

Fig. 3 – **High resolution bathymetric survey and images from the acoustic camera.** 1: Philippe-le-Bel Tower; 2: remnant pile of the Saint-Bénézet Bridge; 3: position of the acoustic camera; 4: location of the structures identified using the acoustic camera; 5: no bathymetric data. A and B: snapshots from the acoustic camera.

fig. 2). La position géographique des données a été relevée par un GPS différentiel mobile et corrigé en temps réel par un bathycélérimètre embarqué, ce qui a ainsi permis d'obtenir une précision centimétrique des relevés. Les données sur la profondeur du chenal intégrées au SIG sont exprimées par rapport au nivellement général de la France (NGF, IGN 69). La bathymétrie (fig. 2 et fig. 3) indique notamment la présence d'éléments en élévation dans les bras du Rhône que les documents vidéo de la caméra acoustique (embarquée en même temps que le sonar) permettent d'identifier et de caractériser (fig. 3).

Cette dernière technique met en œuvre une caméra acoustique haute définition de type Blue View, qui émet une impulsion sonore dans un volume important de la colonne d'eau avec une cadence d'environ 5 émissions par seconde. Elle consiste pour chaque émission et pour chacun des 728 faisceaux de la caméra acoustique, à détecter la variation de l'intensité de l'écho avant celui du fond. Tout « objet » présent dans la colonne d'eau peut être détecté dans la mesure où la caméra enregistre l'intégralité du signal à chaque émission. Le résultat de l'ensemble de ces enregistrements permet une imagerie bidimensionnelle du fond du chenal. Après avoir visualisé les « films » issus de la caméra acoustique, des captures d'écran des anomalies topographiques du fond du chenal ont été réalisées. En connaissant la position de la caméra et le cap de l'embarcation, grâce au GPS différentiel, et à partir des informations concernant la distance et l'angle de l'objet identifié (indiquées sur la capture d'écran), nous avons procédé à une rectification de la position des éléments susceptibles d'être des composants du pont (fig. 3A et B). La position géographique de l'objet identifié étant ainsi connue, cette méthode permet aussi d'avoir accès aux dimensions des objets grâce au croisement avec les données bathymétriques dans le SIG.

Carottages

Cinq carottages ont été réalisés sur les profils TRE grâce à un carottier à percussion de type Cobra TT (tab. 2 et fig. 4). En plus d'une description lithologique visuelle, des échantillons ont été prélevés selon un intervalle régulier de 5 cm et une résolution accrue à 2 cm aux changements de faciès. Nous présenterons les données les plus importantes

qui portent sur quatre des cinq sondages, Vill 1, Vill 2, Vill 3 et Vill 4 (respectivement 7,6 m ; 6 m ; 6,35 m et 6,25 m de profondeur). Le carottage Vill 5 (3,05 m de profondeur) n'a pu être étudié avec la même qualité que les autres carottages en raison de sa faible profondeur mais aussi dû au manque de sédiments pour y réaliser des études granulométriques pertinentes. Au total, 352 échantillons ont fait l'objet de mesures de susceptibilité magnétique et de granulométrie laser, nous permettant ainsi de restituer la dynamique hydro-sédimentaire du Rhône dans la plaine alluviale du côté de Villeneuve-lès-Avignon.

Mesures de la susceptibilité magnétique

Au CEREGE, les échantillons ont fait l'objet de mesures de la susceptibilité magnétique à basse (976 Hz) et haute fréquence (15616 Hz) avec un Kappabridge MFK1-FA. Les données brutes ont été rapportées au poids de l'échantillon afin d'avoir des valeurs de susceptibilité massique exprimées en $\times 10^{-8}$ m³/kg. À côté d'une contribution paramagnétique de l'argile qui reste limitée, le signal magnétique est surtout lié à des grains magnétiques de petite taille (magnétite et maghémite) dont la présence dépend de plusieurs facteurs. Les variations de la susceptibilité magnétique peuvent ainsi être dues à un enrichissement en oxydes de fer par dissolution de la teneur en matériaux diamagnétiques (calcite, quartz ; Eyre et Shaw, 1994). L'augmentation du signal de susceptibilité magnétique est également dépendant de plusieurs paramètres dont la composition minéralogique du bassin-versant (Le Borgne, 1955 ; Marmet, 2000 ; Weston, 2004 ; Ghilardi *et al.*, 2008 ; Vella, 2010) et l'influence des processus pédogénétiques (Fassbinder *et al.*, 1990) et pyrogéniques (écobuage). Les propriétés magnétiques sont également liées aux variations de teneur en eau de la nappe phréatique (Deng *et al.*, 2006 ; Fialova *et al.*, 2006). A tous ces phénomènes s'ajoutent des paramètres anthropiques et les pratiques agricoles comme l'apport d'engrais et les labours (Tite et Mullins 1971 ; Marmet *et al.*, 1999). Pour les sites ayant connu de fortes concentrations humaines, les apports de matière organique modifient les conditions d'oxydo-réduction et influent aussi sur les propriétés magnétiques. Dans la vallée du Rhône, les études de susceptibilité magnétique montrent que le signal enregistré dans la partie amont est assez faible

Carottage	Altitude par rapport au niveau moyen de la mer (en m)	Easting (en m) Lambert 93	Northing en (m) Lambert 93	Profondeur (en m)
Vill 1	16,4	844742	6320072	7,6
Vill 2	16,5	844923	6320088	6,35
Vill 3	16,4	844742	6320069	6
Vill 4	17,1	844967	6320358	6,25
Vill 5	16,9	845190	6320088	3,1

Tab. 2 – Localisation des carottages.

Tab. 2 – Location of boreholes.

Carottage	Référence échantillon	Code laboratoire	Profondeur (en m)	Matériau	Âge BP	Erreur	Âge apr. J.-C. (2 σ)
Vill 3	V3C3_265	Poz-48705	2,65	Charbon	430	30	1421-1615
Vill 3	V3C3_285	Poz-48706	2,85	Charbon	290	30	1492-1662
Vill 4	V4C2_160	Poz-48709	1,6	Charbon	205	30	1646-1808
Vill 4	V4C3_275	Poz-48710	2,75	Charbon	120	25	1681-1896

Tab. 3 – Résultats des datations par le radiocarbone.

Tab. 3 – Radiocarbon dating results.

(Vannière *et al.*, 2000 ; Arnaud *et al.*, 2005 ; Salvador *et al.*, 2005 ; Debret *et al.*, 2010) et aval (Arnaud-Fassetta *et al.*, 2000, 2005). Une modification de la zone d'apport des minéraux magnétiques par une augmentation des crues originaires de la zone cévenole (Azergues, Eyrieux, Ardèche, Cèze) au substrat géologique riche en basalte, pourrait aussi être une explication de la variation du signal magnétique (Arnaud-Fassetta *et al.*, 2005). Une autre source d'apport en minéraux ferromagnétiques à considérer est la suture ophiolitique des Alpes, drainée par l'Isère en rive gauche. L'érosion des terrasses alluviales et des versants à proximité directe des chenaux étudiés peut aussi être un élément de réflexion.

Granulométrie des dépôts

La caractérisation granulométrique des échantillons a été menée à l'aide d'un granulomètre laser de type Beckman Coulter LS 13 320. Ce granulomètre compte 116 détecteurs permettant, avec la technologie PIDS (*Polarization Intensity Differential Scattering*), d'acquies, en une seule analyse, le spectre des classes de taille de grains de 0,04 μm à 2 000 μm avec un haut pouvoir séparateur. Le modèle optique utilise l'indice de réfraction $RI = 1,33$ à 20 °C pour l'eau, et un intervalle correspondant aux indices de réfraction de la kaolinite pour la phase solide en solution ($RI = 1,56$). Les coefficients d'absorption sont de 0,15, pour une longueur d'onde laser de 780 nm, et de 0,2 pour celles de la lumière polarisée (Buurman *et al.*, 1996). Les échantillons fins argilo-sableux sont remis en suspension et dilués dans une solution d'héxamétophosphate de sodium à 0,3 % afin de limiter les effets d'agrégation des particules fines. Cette phase de dilution s'effectue afin d'obtenir des fenêtres de pourcentages d'obscurité compris entre 8 et 16 % pour la diffraction laser et entre 45 et 70 % pour la polarisation de la lumière sur le PIDS afin d'éviter le phénomène de rétrodiffusion de la lumière. L'erreur associée à la reproductibilité du prélèvement lors de cette dilution est de l'ordre du pourcent (moyenne sur 5 aliquots d'une même solution ; Ghilardi *et al.*, 2012). Cette méthode d'étude nous a permis de caractériser quantitativement la granulométrie des sédiments qui composent le remblaiement de la plaine alluviale du Rhône. Lors de l'étude sédimentaire des carottes, plusieurs niveaux contenant des débris végétaux et des charbons ont été mis en évidence dans les carottages Vill 3 et Vill 4. Quatre échantillons ont ainsi été prélevés (tab. 3) et ont fait l'objet d'un envoi au laboratoire de Poznań (Po-

logne) pour datation par le radiocarbone. Les résultats ont ensuite été calibrés grâce au logiciel Calib 6.0 en utilisant la courbe de calibration Intcal09.14c (Reimer *et al.*, 2009).

Tomographie de résistivité électrique

Afin de visualiser la géométrie et de caractériser la nature du remblaiement sédimentaire de la plaine alluviale, nous avons réalisé six profils électriques dans la plaine actuelle, à proximité du fort Saint-André (fig. 4). La tomographie de résistivité électrique (TRE) permet de mesurer en continu les variations en deux dimensions (distance/profondeur) de la résistivité électrique du sous-sol. L'analyse des images obtenues permet d'apprécier la géométrie et la localisation des formations géologiques présentant des aptitudes différentes à conduire un courant électrique. La TRE a montré sa pertinence dans de nombreux travaux de géologie de subsurface et en particulier en géomorphologie, en sédimentologie et en géoarchéologie (Beauvais *et al.*, 2004 ; Maillet *et al.*, 2005 ; Pellicer et Gibson, 2011 ; Laigre *et al.*, 2012 ; Van Dam, 2012). Dans le cadre de cette étude, deux flûtes de 32 électrodes chacune et un protocole Wenner-Schlumberger réciproque ont été utilisés. Ce dispositif permet un bon compromis entre le dispositif Wenner (sensible aux structures horizontales) et le Dipôle-Dipôle (sensible aux structures verticales). Ce dispositif a aussi une profondeur de pénétration d'environ 10 % supérieure au Wenner. De plus, l'arrangement des électrodes en dispositif Wenner-Schlumberger permet, avec un nombre égal d'électrodes, d'effectuer un nombre supérieur de mesures. On obtient donc un modèle plus précis. Ce matériel permet l'acquisition de plus de 900 mesures indépendantes de résistivité apparente (Griffiths *et al.*, 1990) correspondant à différents volumes de matériaux à différentes positions. Une modélisation par inversion est nécessaire pour obtenir une image exploitable de la distribution des résistivités à chaque point de mesure. Ce traitement est effectué à l'aide du logiciel RES2DINV (Loke et Barker, 1996). L'espacement inter-électrodes affecte la longueur du profil ainsi que la profondeur d'investigation et la résolution (Ritz *et al.*, 1999 ; Beauvais *et al.*, 2004). Un faible espacement inter électrodes permet une bonne résolution mais une faible profondeur d'investigation. Nous avons donc utilisé plusieurs espacements afin d'avoir un bon compromis entre la profondeur et la taille des objets recherchés. Dans notre cas, deux espacements inter-électrodes ont été retenus : une distance de 4 m pour AVI 05 (fig. 6), ce qui permet d'atteindre une profondeur de 32 m, et une distance de 1,5 m pour AVI 07 avec 12 m de profondeur d'investigation. L'erreur associée à ces mesures est inférieure au pour-

Fig. 4 – Localisation des carottages et des profils de tomographie de résistivité électrique (TRE) dans le secteur du fort Saint-André (Villeneuve-lès-Avignon). 1 : borne altimétrique ; 2 : carottages réalisés dans le cadre de cette étude ; 3 : profils TRE ; 4 : tour Philippe-le-Bel ; 5 : pile restante du pont Saint-Bénézet ; 6 : pont Saint-Bénézet.

Fig. 4 – Boreholes and Electric Resistivity Tomography (ERT) profiles location in the area of the Saint-André Fort (Villeneuve-lès-Avignon). 1: baseline; 2: boreholes drilled within the framework of the present article; 3: ERT profiles; 4: Philippe-le-Bel Tower; 5: remnant pile of the Saint-Bénézet Bridge; 6: Saint-Bénézet Bridge.

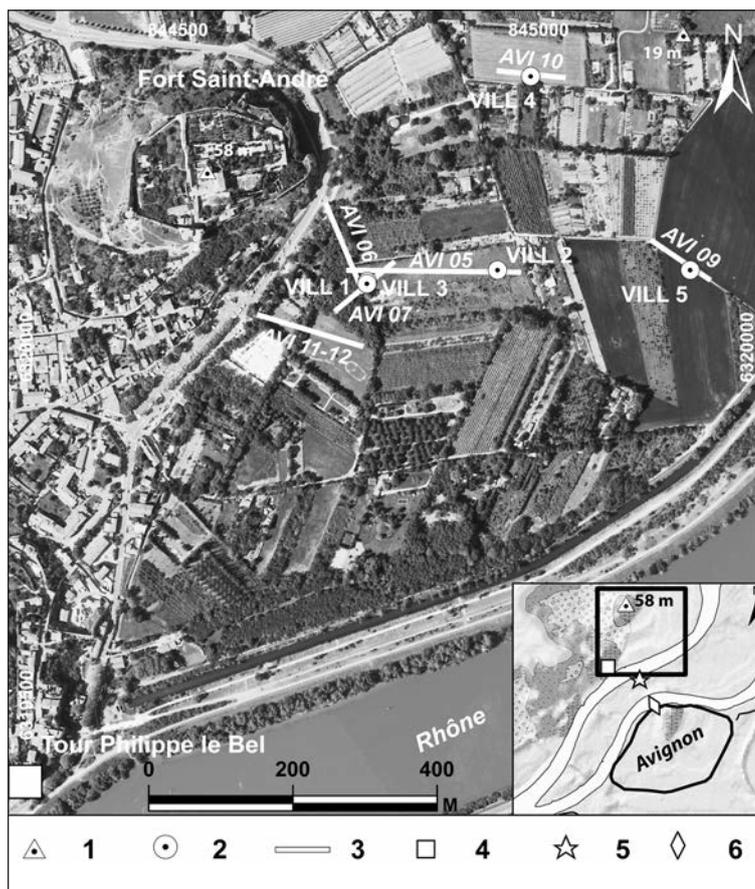
cent. Les facteurs influençant la conductivité électrique sont principalement la nature lithologique du substrat géologique, la porosité et la teneur en eau et en sel. Ainsi, la TRE ne permet pas de fournir une unique interprétation de la nature du substrat, différents matériaux pouvant avoir des propriétés géo-électriques similaires. En l'absence de données géophysiques préexistantes dans ce secteur, il n'est pas possible de proposer des gammes de valeur (résistivité apparente/granularité) pour confirmer la classification proposée dans les résultats. L'interprétation dépend donc d'une bonne connaissance du contexte hydrosédimentaire local qui est validée ici par des carottages afin d'associer le plus précisément possible les formations sédimentaires de la plaine alluviale aux mesures de la résistivité électrique.

Résultats

Données issues de l'étude de géographie historique

Implantations des piles du pont

Les sources cartographiques anciennes (tab. 1) permettent de retrouver les traits morphologiques qui rendent le pont Saint-Bénézet identifiable. La carte d'Ignazio Danti, datée de 1580-1583, ne peut être utilisée pour restituer précisément la position des piles du pont. En revanche, ce premier document révèle nettement deux inflexions de la direction du tablier et un raccourcissement de la distance entre les piles du côté de Villeneuve-lès-Avignon, apportant ainsi les premiers éléments de réflexion concernant la forme de l'édifice. La carte du comtat Venaissin est la première représentation graphique fiable du secteur d'Avignon au niveau géomorphologique. La précision des détails permet de distinguer une « ambiance » hydromorphologique. Cependant, la localisation précise des bancs sableux n'est pas possible en raison du manque d'éléments de géoréférencement. La superposition du plan Montaigu de 1685 et des cartes établies à la même période (Plan du pont d'Avignon et Plan de Villeneuve-lès-Avignon du fort Saint-André et de la tour du Pont) montre une excellente corrélation de la position des piles du pont



Saint-Bénézet dans le bras d'Avignon avec quelques divergences du côté du bras de Villeneuve (fig. 5A). La carte de 1776 (fig. 5B) est très imprécise quant à la localisation du pont qui, ici, est représenté en tirets. Les cartes de 1840-1870 dressées par les Ponts et Chaussées ne portent que peu d'informations sur la morphologie du pont : les piles du côté d'Avignon sont présentes et une seule pile est encore identifiée dans le bras de Villeneuve. Les travaux d'aménagement réalisés afin d'améliorer la navigabilité du Rhône entre 1880 et 1920 puis pour la production hydro-électrique par la CNR en 1970-73 conduisent à la submersion des derniers témoins de la présence du pont dans le bras de Villeneuve (CNR, 1970). La superposition des cartes anciennes avec les données de la CNR permet de diminuer l'incertitude concernant la position des piles du pont et de déterminer leur état de conservation avant leur destruction au milieu du XX^e s. (fig. 5C). Selon ces relevés, qui concernent les piles 13 à 17, et bien que les vestiges ne permettent pas de positionner un axe ou un centre de pile, la distance entre les vestiges des piles semble très variable et peut être estimée entre 40 et 50 m.

Restitution de la morphologie du chenal et de la plaine alluviale du Rhône dans le secteur de la tour Philippe-le-Bel et du fort Saint-André

Les différentes cartes (tab. 1) que nous avons utilisées pour cette étude nous apportent une information supplémentaire sur la localisation des piles du pont. Ainsi, la carte de 1580-

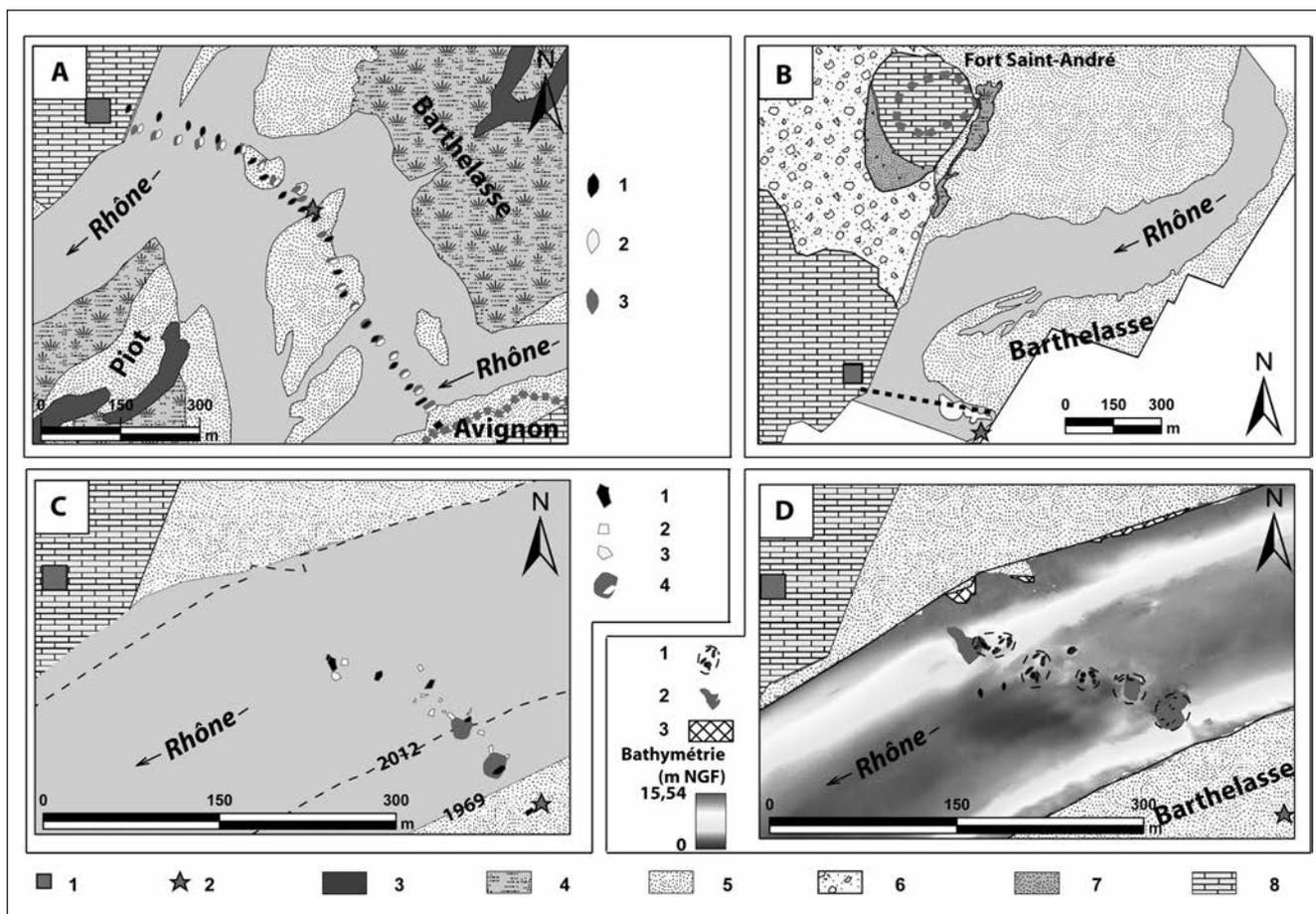


Fig. 5 – Cartes paléo-géographiques dérivées du croisement des données historiques (tab. 1), de la bathymétrie et de la caméra acoustique. 1 : tour Philippe-le-Bel ; 2 : pile restante du pont Saint-Bénézet ; 3 : paléochenal ; 4 : marais ; 5 : plaine alluviale holocène ; 6 : colluvions quaternaires ; 7 : grès et sables (Miocène) ; 8 : calcaires (Barrémien). A : 1685. 1 : position des piles du pont Saint-Bénézet selon le Plan du pont d'Avignon ; 2 : position des piles du pont Saint-Bénézet selon le Plan de Villeneuve-lès-Avignon, du fort Saint-André et de la tour du Pont ; 3 : position des piles du pont Saint-Bénézet selon le Plan Montaigu. B : 1776. Le tireté noir représente la position du pont Saint-Bénézet selon le document original. Le tireté rouge représente l'enceinte du fort Saint-André. C : 1970. 1 : éléments de pile ; 2 : éléments de tablier du pont ; 3 : éléments non identifiés ; 4 : éboulis d'éléments de maçonnerie. D : 2012. 1 : éléments de pile en place ; 2 : éboulis d'éléments de maçonnerie ; 3 : absence de données bathymétriques.

Fig. 5 – Palaeogeographic maps derived from the cross combination of historical sources (tab. 1), bathymetry and acoustic camera. 1: Philippe-le-Bel Tower; 2: remnant pile of the Saint-Bénézet Bridge; 3: palaeochannel; 4: swamps; 5: Holocene alluvial plain; 6: Quaternary colluviums; 7: sandstone and sand (Miocene); 8: limestone (Barremian). A: 1685. 1: position of the Saint-Bénézet Bridge piers after the Plan of the Avignon's Bridge; 2: position of the Saint-Bénézet Bridge piers after the Plan of Villeneuve-lès-Avignon, Saint-André Fort, and the Bridge Tower; 3: position of the Saint-Bénézet Bridge piers after the Montaigu Map. B: 1776. The black dashed line represents the location of the Saint-Bénézet Bridge from the original document. The red dashed line represents the location of the Saint-André Fort. C: 1970. 1: parts of piles; 2: parts of the deck's bridge; 3: unidentified structures; 4: debris of masonry. D: 2012. 1: remnant structures of in situ piles; 2: debris of masonry; 3: no bathymetric data.

1583, réalisée par I. Danti et conservée au Vatican, bien que très « stylisée », montre une bande active de tressage. La morphologie des îles reste très imprécise mais leur localisation est strictement circonscrite en amont du pont. Aucune indication ne nous permet d'identifier et de différencier ces îles mais leur taille suggère qu'une forme proche de celle de l'île de la Barthelasse était déjà présente à cette époque.

Le plan Montaigu et les plans établis à la même période nous apportent des informations plus précises. Si le pont semble en grande partie encore en eau à la fin du XVII^e s. (fig. 5A), de nombreux îlots sableux sont présents au pied des piles entre l'île de la Barthelasse et l'île Piot. La forme

et la position de ces îlots semblent indiquer que les piles modifient l'écoulement et freinent le transit sédimentaire. Plus au nord, au pied du fort Saint-André, le Rhône occupe l'ensemble de la plaine alluviale actuelle et un petit chenal d'environ 40 m de large est encore actif. Ici aussi, quelques îlots sableux non végétalisés s'individualisent au sein du bras de Villeneuve qui mesure environ 600 m de large. Les différentes cartes établies au cours de cette période fournissent des informations sur la nature des formations superficielles. La présence de plusieurs chenaux et de marais est un marqueur d'une morphologie en tresses actives.

Un siècle plus tard, la plaine alluviale présente une morphologie très différente. En 1776 (fig. 5B), les îlots sableux au pied du fort Saint-André ont fusionné et l'on y trouve des terres cultivées alors que le chenal de 1685 est devenu une lône. Le chenal principal du côté de Villeneuve s'est décalé vers le sud-est et ne mesure plus que 300 m de large, d'après les informations reportées sur la carte dressée par un correspondant de l'Académie de Médecine. Les marais identifiés sur la carte de 1776 sont donc les témoins de la fermeture de l'un de ces chenaux. Ces environnements, caractérisés par des vitesses d'écoulement de faibles à nulles et une fraction argileuse importante (dépôts par décantation), sont des environnements favorables à la multiplication des moustiques et au développement du paludisme dans la région. La deuxième moitié du XIX^e s. (carte des Ponts et Chaussées) est marquée par d'importants aménagements hydrauliques (digues insubmersibles continues dans la plaine, réduction artificielle de la largeur du chenal par des « casiers »). A partir de cette période et à l'exception des périodes de forte crue, la plaine alluviale est déconnectée des apports sédimentaires du Rhône.

L'étude diachronique des documents iconographiques centrés sur la plaine alluviale actuelle de Villeneuve montre donc un écoulement puis un déplacement vers l'est du bras de Villeneuve et, enfin, un remblaiement important de la zone du fort Saint-André entre les XVI^e et XVIII^e s. L'autre point important mis en évidence par l'iconographie la plus ancienne est l'absence de bancs alluviaux sous le pont entre le XVI^e et le XVII^e s.

Relevés bathymétriques et de la caméra acoustique

La caractérisation bathymétrique du chenal actuel du Rhône, mesurée précisément grâce à des relevés effectués par sonar multifaisceaux (fig. 3 et fig. 5D), révèle des différences importantes dans la morphologie et la profondeur des deux bras du Rhône. Les résultats démontrent que le chenal du bras de Villeneuve-lès-Avignon est plus bas (> 1 m NGF) que celui d'Avignon (< 3 m NGF). Dans leur morphologie actuelle, qui est complètement artificialisée par l'aménagement CNR, le bras d'Avignon est recoupé par l'aménagement et ne reçoit qu'un débit « réservé » de 300 m³/s environ. C'est donc un secteur en cours d'alluvionnement. Le bras de Villeneuve-lès-Avignon écoule l'essentiel du débit dans un chenal rectifié. L'analyse détaillée des relevés bathymétriques met en évidence la présence d'anomalies topographiques qui ne semblent pas être liées à des processus d'accumulation sédimentaire d'origine naturelle. La position et la forme de ces anomalies suggèrent la présence de vestiges du pont encore en place dans les deux bras du Rhône. Les images de ces anomalies, transmises par la caméra acoustique, montrent la présence d'accumulations d'éléments de maçonnerie sur plusieurs mètres carrés, dont certains encore en place (dressées verticalement sur le fond du chenal), à intervalles réguliers dans les bras du Rhône. Ainsi, dans le bras d'Avignon, deux anomalies topographiques constituées chacune d'un amas de blocs de maçonneries plurimétriques et situés à respectivement environ 40 et 80 m de distance de la pile 4

sont visibles (fig. 3B). Les vestiges y sont encore bien visibles (fig. 3 et fig. 5D) et atteignent entre 1 et 3 m de hauteur par rapport au fond du chenal. Par ce biais, il est donc possible de restituer la position des ruines des piles du pont dans les deux bras du Rhône (piles 5 et 6 dans le bras d'Avignon, piles 15 à 19 côté Villeneuve-lès-Avignon). La distance mesurée entre les blocs dans le bras de Villeneuve indique que les piles sont distantes en moyenne de 35 à 42-43 m. À l'aval des piles encore présentes du côté d'Avignon, la diminution de la profondeur de l'eau peut être mise en relation avec la diminution des vitesses d'écoulement donc des modifications hydrodynamiques induites par le pont.

Chronostratigraphie des carottages

Le croisement des données granulométriques avec les mesures de la susceptibilité magnétique permet de différencier sept unités sédimentaires (US ; fig. 6) :

- US1 : présente dans tous les carottages, elle est constituée de galets émoussés hétérométriques granitiques ou calcaires. Cette formation est identifiée à des profondeurs différentes dans les carottages Vill 1, Vill 2, Vill 3 et Vill 5 (respectivement 7,1 m, 5,6 m, 6,2 m et 2,95 m). Les analyses de susceptibilité magnétique n'ont pu être directement réalisées sur les galets et seule la fraction grossière de leur matrice (inférieure à 2 mm) a été analysée. Les résultats montrent des valeurs assez faibles.

- US2 : épaisse d'environ 1,6 à 1,8 m (fig. 7), elle est composée en grande majorité de sables et repose sur la nappe de galets (US1). La taille moyenne des grains dans Vill 1 et 3, comprise entre 160 et 220 μm , est cependant inférieure à celle des grains dans Vill 2 (220-260 μm). Le mode, compris entre 200 et 220 μm , indique une énergie relativement importante. La diminution de la fraction limono-argileuse, inférieure à 63,4 μm , entre la base et le sommet de cette couche, indique une augmentation progressive de la compétence. Les valeurs de susceptibilité magnétique sont relativement faibles dans tous les carottages et sont généralement comprises entre 15 et 20 $\times 10^{-8}$ m³/kg. La susceptibilité dépendante en fréquence (SDF) est pour sa part inférieure à 4 %, indiquant une faible contribution des particules superparamagnétiques dans la valeur du signal. Ces particules sont probablement d'origine détritique. Dans Vill 4, cette unité est plus diversifiée. Un ensemble enrichi en limons fins (US2a ; grain moyen autour de 20 μm) d'environ 1 m d'épaisseur s'intercale au sein des sables avant que la taille des grains n'augmente progressivement (US2b).

- US3 : épaisse de 0,2 à 1 m, elle présente une granulométrie plus grossière. Quelques graviers sont également identifiés dans Vill 1 et la taille moyenne des grains (260-420 μm) est plus élevée que celle de la couche sous-jacente (US2) sur l'ensemble des carottages. Le mode est compris entre 260 et 420 μm et suit les mêmes variations que celles du grain moyen. Les mesures de susceptibilité magnétique indiquent des valeurs comprises entre 15 et 20 $\times 10^{-8}$ m³/kg et ne montrent pas de variation significative avec US2. En revanche, une augmentation notable de la SDF (> 10 %) peut être observée vers 4,7 m de profondeur dans Vill 3. Cette phase montre

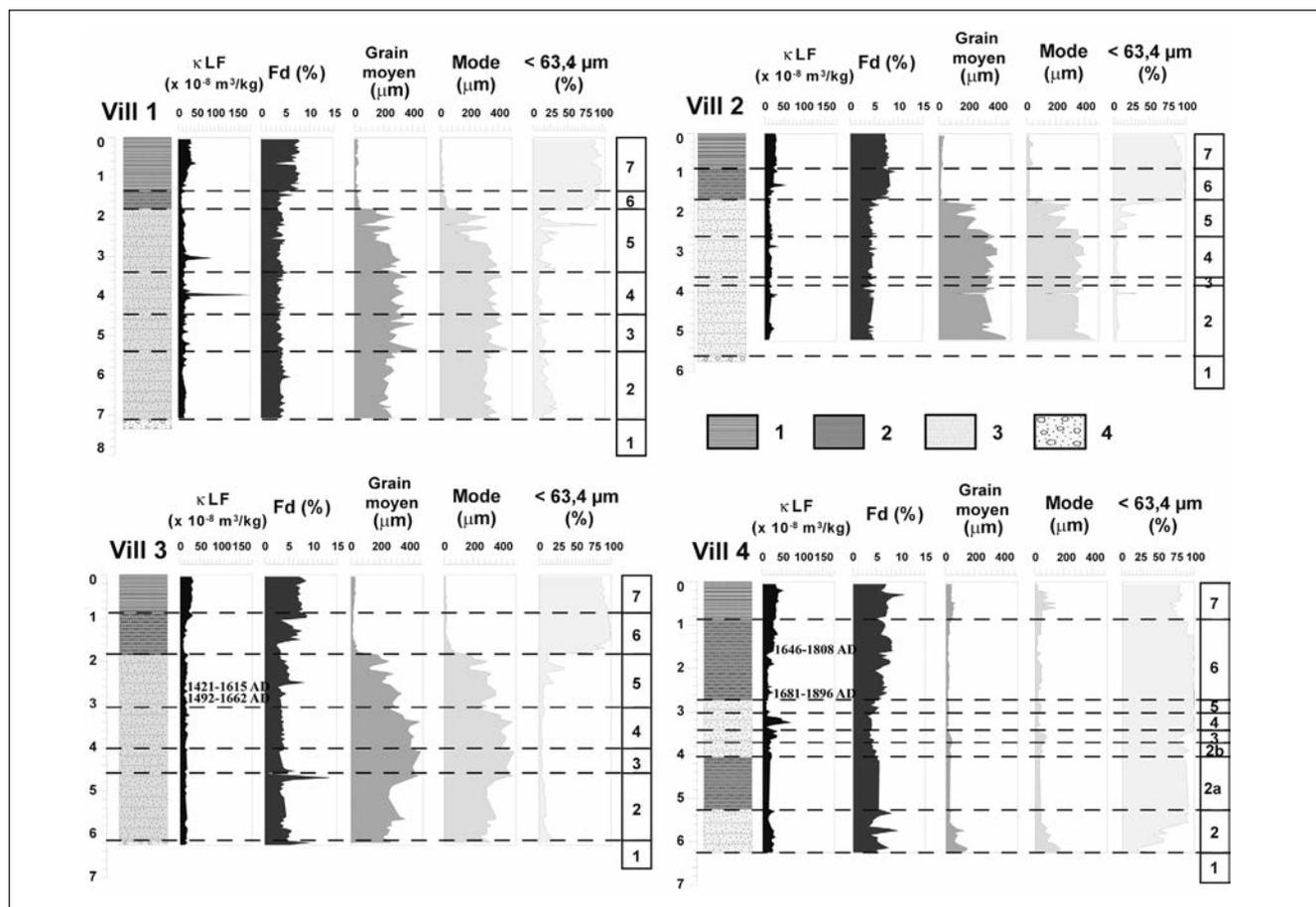


Fig. 6 – Stratigraphie, sédimentologie, susceptibilité magnétique et données de résistivité des carottes Vill 1, Vill 2, Vill 3 et Vill 4. 1 : limons récents ; 2 : argiles ; 3 : sables ; 4 : galets.

Fig. 6 – General stratigraphy, sediment results and resistivity data derived from boreholes Vill 1, Vill 2, Vill 3 and Vill 4. 1: recent silt; 2: clay; 3: sand; 4: pebbles and coarse debris.

une réactivation partielle des chenaux au pied du fort de Villeneuve. L'épaisseur de cette unité est plus importante dans Vill 1 et Vill 3 que dans Vill 2. Ces observations dans Vill 1 et Vill 3 (mode plus grossier, épaisseur accrue et SDF plus élevée) suggèrent une activité fluviale plus intense et pourrait indiquer une différence de position des carottages vis-à-vis du chenal actif au niveau de ces deux carottages.

- US4 : d'une épaisseur d'environ 0,9 m, elle présente une texture globalement sableuse. La taille des grains moyens et la distribution modale indiquent que les sables (270-430 μm) sont plus grossiers que dans US2. La susceptibilité magnétique, globalement plus élevée (15-24 $\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) que pour les formations précédentes, présente quelques variations notables dans Vill 1 (à 3,97 m, pic à 177 $\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$). La SDF ne montre pas de variations significatives.

- US5 : d'une épaisseur variant de 0,72 à 1,65 m, elle est plus contrastée. La granulométrie des dépôts décroît progressivement (de 250 à 100 μm pour le grain moyen) avec des passées plus grossières (mode d'environ 260 μm). La susceptibilité magnétique reste relativement faible pour cet ensemble (15-20 $\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$). Dans Vill 1, les mesures de la susceptibilité magnétique montrent une augmentation significative à 3,04 m de profondeur avec une valeur proche

de 85 $\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. La SDF montre peu de variations sauf dans Vill 3 où les mesures sont plus élevées (~ 8 %). Cette phase montre le remblaiement progressif des chenaux situés en contrebas du fort Saint-André et leur réactivation périodique lors de crues particulièrement importantes. Deux datations par le radiocarbone (tab. 3) réalisées sur des charbons situés dans la partie basale de US5 du carottage Vill 3 indiquent des âges compris entre 1421-1615 apr. J.-C. (430 \pm 30 BP) et 1492-1662 apr. J.-C. (290 \pm 30 BP). En complément, un échantillon de matière végétale prélevé au sommet de cette unité (2,75 m de profondeur) dans la carotte Vill 4 indique un âge de 1681-1896 apr. J.-C. (120 \pm 25 BP).

- US6 : épaisse de 0,4 à 0,8 m, elle est constituée de dépôts fins (limono-argileux). Le mode granulométrique indique des valeurs comprises entre 40 et 60 μm et une fraction granulométrique inférieure à 63,4 μm qui atteint presque les 100 %. À la base de cette formation (entre 1,8 et 1,82 m de profondeur), la susceptibilité magnétique présente les valeurs les plus faibles sur l'ensemble des sondages (4-8 $\cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) qui sont liées à des phénomènes d'hydromorphie du sédiment et aux phénomènes de battement de nappe à l'origine de la dissolution des grains magnétiques (Le Borgne, 1955). Dans Vill 2, les mesures de la susceptibilité magnétique montrent une aug-

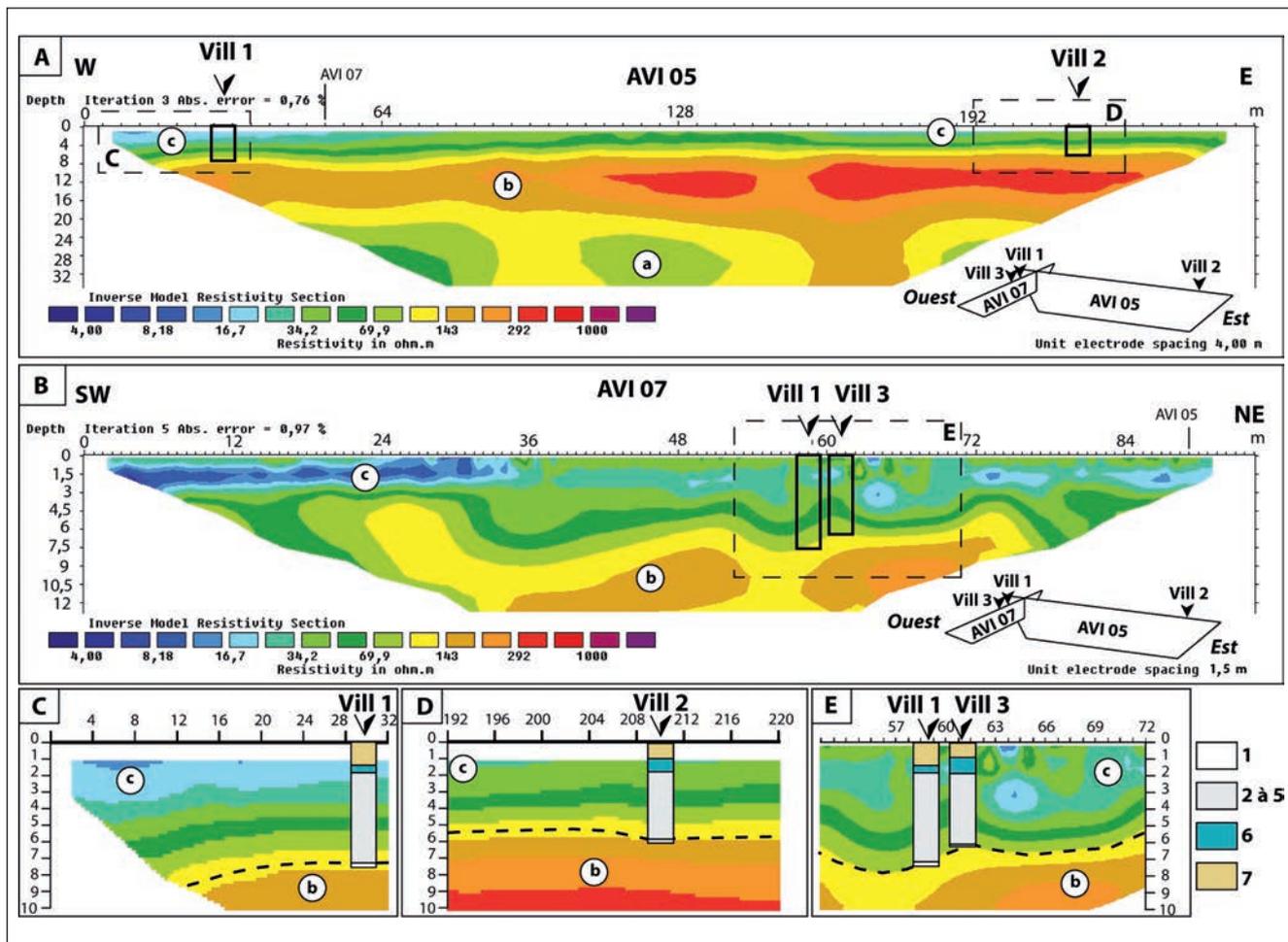


Fig. 7 – Corrélation entre les données des profils TRE et les données stratigraphiques. La ligne en tirets noirs représente la limite entre les galets et les sables. 1 : galets ; 2 à 5 : sables ; 6 : argiles ; 7 : limons récents.

Fig. 7 – Correlation between ERT profiles results and sedimentological analyses. The black dashed line represents the limit between pebbles and sand. 1 : pebbles; 2 à 5 : sand; 6 : clay; 7 : recent silts.

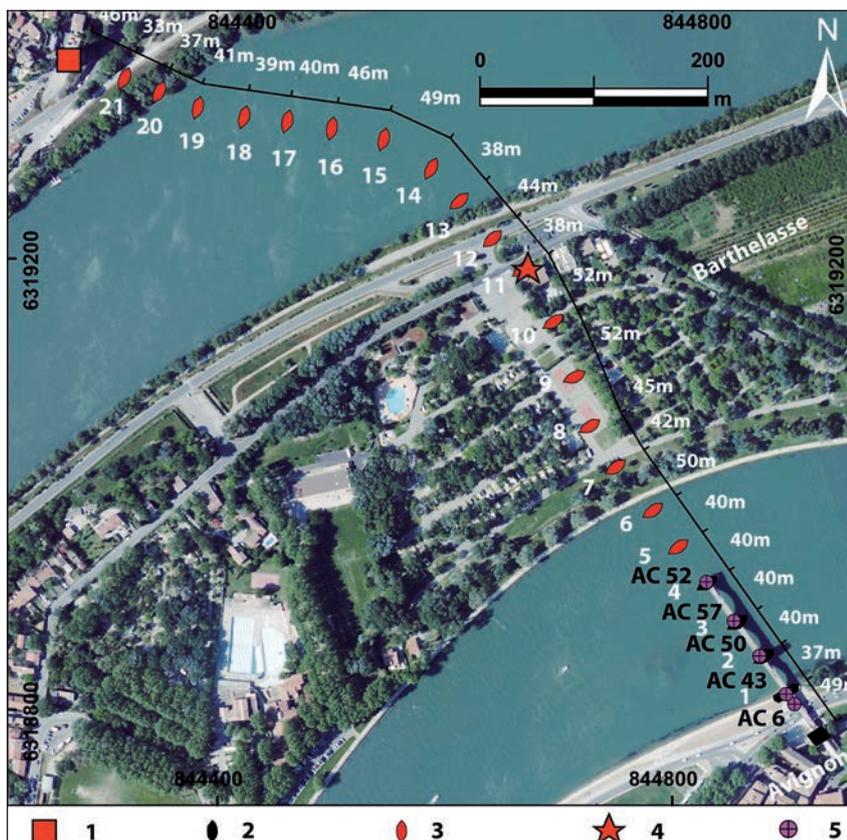


Fig. 8 – Essai de restitution de la position des piles du pont Saint-Bénézet. 1 : tour Philippe-le-Bel ; 2 : piles du pont Saint-Bénézet encore en place ; 3 : proposition de restitution de la position des piles du pont Saint-Bénézet ; 4 : pile restante du pont Saint-Bénézet ; 5 : Localisation des sondages réalisés sur le pont Saint-Bénézet par la CNR (1965-66).

Fig. 8 – Attempt for reconstructing the location of the Saint-Bénézet Bridge piles. 1 : Philippe-le-Bel Tower; 2 : piles of the Saint-Bénézet Bridge still in place; 3 : proposition of reconstruction for the position of the Saint-Bénézet Bridge piles; 4 : remnant pile of the Saint-Bénézet Bridge; 5 : location of the drillholes undertaken by the CNR (1965-66).

mentation significative à 1,38 m ($42 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$). Une datation par le radiocarbone (tab. 3) réalisée au centre de US6 du carottage Vill 4 (1,6 m de profondeur) indique un âge de 1646-1808 apr. J.-C. ($205 \pm 30 \text{ BP}$).

- US7, la plus proche de la surface et épaisse d'environ 0,8 à 1,4 m, elle est composée de limons récents (mode et grain moyen compris entre 40 et 60 μm) avec une contribution des éléments inférieure à 63,4 μm moins importante que dans US6. US7 présente en revanche une augmentation significative de la susceptibilité magnétique qui est à mettre en relation avec la superposition de processus pédogénétiques récents. La SDF montre une variation et des valeurs similaires dans tous les carottages. Les valeurs atteignent 9 % et indiquent une augmentation de la contribution des particules superparamagnétiques au signal mesuré.

Prospection géoélectrique (TRE) et corrélations avec les carottages

Le profil électrique AVI 05, réalisé avec un espacement latéral inter électrodes de 4 m, a permis d'obtenir une profondeur d'investigation supérieure à 32 m (fig. 7A). Le profil électrique AVI 07 a été réalisé avec un espacement entre électrodes de 1,5 m. Il présente une résolution plus fine dans les unités sédimentaires les plus superficielles, jusqu'à environ 12 m de profondeur, permettant ainsi une corrélation avec les données de carottages. La complémentarité en terme de résolution verticale des profils électriques AVI 05 et AVI 07 permet d'identifier trois unités géoélectriques (UGE ; fig. 7A et fig. 7C), auxquelles nous proposons aussi une interprétation sédimentologique, fondée sur l'analyse granulométrique des carottages :

- UGEa : elle n'est présente que dans la partie inférieure du profil AVI 05 (fig. 7A) et se situe entre environ 16 et 32 m de profondeur. Elle présente des valeurs de résistivité comprises entre 50 et 150 $\Omega\cdot\text{m}$ avec, localement, de fortes variations. La nature karstique du substrat et l'infiltration des eaux de la nappe alluviale peuvent expliquer les différences latérales de résistivité. La forme relativement tabulaire et légèrement inclinée W-E, avec une remontée du toit de cette unité vers l'ouest, laisse entrevoir la présence du substrat calcaire barremien, caractéristique des environs d'Avignon (fig. 1). Les forages réalisés dans la région (BSS Banque de données du sous-sol (BRGM, 2012) confirment d'ailleurs la présence du substrat rocheux à ces profondeurs. Les carottages que nous avons réalisés dans le cadre de l'étude du pont d'Avignon n'ont pas atteint ce niveau.

- UGEb : elle est située au centre du profil AVI 05 et se retrouve à la base du profil AVI 07. Elle se localise à une profondeur oscillant entre 4 et 16 m de profondeur et les valeurs de résistivité sont plus élevées, comprises entre 140 et 300 $\Omega\cdot\text{m}$. Cet ensemble, continu sur l'ensemble du profil AVI 05 et peu incliné, présente plusieurs surcreusements mieux visibles sur le profil AVI 07 (fig. 7B), sans doute liés à l'érosion localisée de cette unité. La corrélation avec les carottages permet de constater que UGEb est composée dans sa partie supérieure par des débris très grossiers (galets). L'analyse granulométrique de Vill 1 et Vill 3 confirme la

présence de galets, respectivement à 7,1 et 5,6 m de profondeur (US 1 ; fig. 6). UGEb peut être interprétée, du moins pour sa partie supérieure, comme une nappe de galets déposée, notamment au cours du PAG, par le Rhône dont la morphologie devait être en tresses avec plusieurs chenaux surcreusés localement.

- UGEc : identifiée entre environ 7 m de profondeur et la surface sur les profils AVI 05 et 07 (fig. 7A et fig. 7C), elle présente des valeurs plus faibles (4 à 100 $\Omega\cdot\text{m}$) que dans les deux autres unités, avec une décroissance importante vers le sommet. Les surcreusements observés dans la nappe de galets correspondant au toit de UGEb présentent de faibles valeurs de résistivité, laissant ainsi suggérer un remblaiement postérieur au dépôt puis à l'incision de UGEb. La corrélation avec les carottages Vill 1 et Vill 3 permet de constater la présence de sables homogènes grossiers entre 7 et 2 m de profondeur (US2 à US5 ; fig. 6), correspondant donc à de plus faibles valeurs de résistivité. Il est également important de relever la dissymétrie des valeurs entre l'ouest et l'est du profil AVI 07 entre la surface et environ 2 m de profondeur. En effet, le secteur situé au pied du fort de Villeneuve (les 40 premiers mètres du profil AVI 07) présente une nappe superficielle de forte conductivité avec des valeurs inférieures à 30 $\Omega\cdot\text{m}$ environ alors que le secteur localisé proche des carottages Vill 1, Vill 2 et Vill 3 présente des valeurs comprises entre 20 et 70 $\Omega\cdot\text{m}$ (US6 et US7 ; fig. 6).

Le niveau de la nappe alluviale, visible lors des carottages, a été atteint vers 1,5 m de profondeur en avril 2012. L'influence de cette dernière sur les résultats de la TRE reste peu notable en raison de la forte résistivité apparente UGEb. En revanche, la baisse de la résistivité observée dans UGEc peut être due à une plus forte concentration en eau dans le sédiment. La nappe superficielle de forte conductivité observée au toit de UGEc (US 6 et US7) serait donc à relier aux sédiments de plus forte porosité et contenant plus d'eau.

Les résultats de la TRE et leur croisement avec les données sédimentaires permettent de mettre en relation des gammes de résistivité avec la granularité des alluvions. Cette étude permet ainsi de spatialiser l'information ponctuelle des carottages et de visualiser avec plus de précision la morphologie de la plaine alluviale. La mise en relation de ces données avec celles de la géographie historique nous permet de relier la nature du remblaiement alluvial avec les formes des paysages anciens et, ainsi, de préciser le cadre chronostratigraphique de l'évolution morphologique de la plaine alluviale.

Discussion

Proposition de restitution du tracé du pont Saint-Bénézet

L'étude croisée du plan Montaigu de 1685 et du plan de 1776 avec les relevés bathymétriques permet d'apporter de nombreuses informations concernant la forme et le tracé du pont d'Avignon grâce à la localisation des vestiges de ses piles (tab. 4 et fig. 8). Concernant la distance entre les piles du pont, si une moyenne générale de 40 m est observée, elle ne semble pas être constante sur la longueur du tracé.

N° de pile	E (en m)	N (en m)	Distance inter-piles	Direction du tablier	Source
culée rive gauche	844929	6318776	0	N 325°	Encore en place
1	844902	6318816	49	N 325°	Encore en place
2	844881	6318848	37	N 325°	Encore en place
3	844858	6318877	40	N 325°	Encore en place
4	844832	6318913	40	N 325°	Encore en place
5	844806	6318945	40	N 325°	Iconographie, bathymétrie, caméra acoustique
6	844783	6318977	40	N 325°	Iconographie, bathymétrie, caméra acoustique
7	844751	6319016	50	N 330°	Iconographie
8	844729	6319051	42	N 335°	Iconographie
9	844715	6319095	45	N 330°	Iconographie
10	844696	6319144	51	N 325°	Iconographie
11	844670	6319190	52	N 325°	Partiellement en place, CNR, iconographie
12	844642	6319218	38	N 325°	CNR, iconographie
13	844613	6319251	44	N 325°	CNR, iconographie
14	844588	6319280	38	N 319°	Bathymétrie, caméra acoustique, CNR, iconographie
15	844547	6319306	49	N 285°	Bathymétrie, caméra acoustique, CNR, iconographie
16	844501	631916	46	N 285°	Bathymétrie, caméra acoustique, CNR, iconographie
17	844462	6319322	40	N 285°	Bathymétrie, caméra acoustique, iconographie
18	844424	6319326	39	N 285°	Bathymétrie, caméra acoustique, iconographie
19	844383	6319334	41	N 295°	Iconographie
20	844349	6319348	37	N 295°	Iconographie
21	844318	6319360	33	N 295°	Iconographie
Tour Philippe le Bel	844267	6319375	46		Encore en place
			$\Sigma = 937$ m		

Tab. 4 – Position supposée des piles du pont Saint-Bénézet.

Tab. 4 – Potential location of the Saint-Bénézet Bridge's piles.

En partant de la rive gauche (fig. 8), la position des piles 1 à 4 est connue car l'édifice est encore en place. En ce qui concerne les piles 5 et 6, les éléments de construction du pont ont pu être localisés grâce aux relevés bathymétriques et à la caméra acoustique. Ils sont espacés d'environ 40 m dans la continuité du tablier encore en place. La position des piles sur l'Île de la Barthelasse est connue grâce à l'étude des cartes anciennes et à la présence d'un élément restant (pile 11) (fig. 1 et fig. 8). La position des piles 12 à 16 est connue grâce aux relevés topographiques effectués par la CNR et parmi elles, les piles 14 à 17 sont confirmées grâce aux relevés bathymétriques et à l'analyse des images livrées par la caméra acoustique. De plus, les relevés bathymétriques et l'utilisation de la caméra acoustique ont permis de localiser la pile 18. L'espacement entre les piles du pont présente une augmentation notable entre les piles 8 et 11 avec des distances moyennes d'environ 50 m. La position des

piles 7, 8, 9 et 10 sur l'île de la Barthelasse ainsi que les piles 20 et 21 dans le bras de Villeneuve est connue grâce à l'étude des cartes anciennes et est donc moins précise que celles qui ont fait l'objet d'un croisement entre plusieurs méthodes (fig. 8).

L'emplacement des piles dans les deux bras du Rhône n'a donc pas été déterminé à intervalle régulier. Le mode de réalisation des fondations par caisson de bois coulé sur place ne permet aucune précision réelle dans l'immersion de chaque caisson servant ensuite de base à l'édification de la pile. Les variations d'écartement et/ou d'orientation des substructions des piles pourraient être reliées en grande partie aux techniques de construction utilisées. Cinq changements d'orientation du tablier selon un arc convexe indiquent sans doute une adaptation de la construction à la morphologie et aux flux hydriques du Rhône (fig. 8). Les premières piles (1 à 7) du côté d'Avignon sont alignées sur une trajectoire recti-

ligne et ont une orientation N325°. À partir des piles 7 et 8, le tablier du pont marque une rotation d'environ 10° vers le Nord (orientation : N335°) alors qu'au niveau de la pile 10, le tablier revient à sa direction d'origine puis à la pile 14, il marque une rotation moins importante de 6° vers l'ouest (orientation : N319°). La pile 15 marque un changement d'orientation vers l'ouest plus important (34°) et prend une orientation N285°. Enfin, à partir de la pile 19, le tablier du pont marque une rotation de 10° environ vers le Nord et prend une orientation N295°. De nos jours, la présence des vestiges du pont influence localement les conditions de dépôt et d'érosion, avec une érosion marquée en amont des structures et une plus forte sédimentation à l'aval des piles qui sont mises en évidence par les relevés bathymétriques (fig. 3). Ces processus, déjà visibles sur la carte de 1685, sont des facteurs de déstabilisation de la structure du pont et ont peut-être été à l'origine des changements d'orientation du pont et de la destruction de nombreuses arches. La restitution précise de la position des piles du pont en fonction des périodes d'utilisation pose encore de nombreuses questions. L'analyse des documents anciens, récemment mis au jour, ainsi que l'apport de carottages supplémentaires implantés sur la Barthelasse permettront non seulement de limiter les incertitudes concernant le nombre de piles mais aussi d'apporter plus de précisions quant à la position de ces dernières.

Evolution hydrosédimentaire du bras de Villeneuve-lès-Avignon (secteur situé au nord de la tour Philippe-le-Bel)

Les études récentes sur l'évolution géomorphologique de la plaine alluviale du Rhône montrent la forte énergie potentiellement disponible dans ce secteur, épisodiquement renforcé lors de certains cycles hydrologiques, en raison du rétrécissement de la plaine alluviale et de la confluence avec la Durance (Bravard, 2010). Plusieurs périodes de forte activité hydrosédimentaire, attestées sur le bas Rhône (Provansal *et al.*, 1999 ; Arnaud-Fassetta, 2000 ; Bruneton *et al.*, 2001), ont mis en place la puissante nappe de galets inférieure (fig 9B) identifiée dans les carottages et les profils TRE (US1, fig. 6 ; UGEb, fig. 7). Celle-ci contraint la morphologie de la plaine alluviale et la position des chenaux lors du PAG. Elle a pu être remobilisée localement lors du PAG, lorsque la bande active du Rhône se situait au pied du fort Saint-André, entre le XV^e s. et la première moitié du XVIII^e s. Nous ne disposons d'aucun indice sur la morphologie fluviale au cours du Moyen-Âge. La forte activité hydrologique du PAG marque le retour à des conditions plus caractéristiques de la morphologie en tresses. Les sables (US2 à US5, fig. 6 ; UGEc, fig. 7) seraient alors représentatifs des dépôts du PAG et indiqueraient que les chenaux du Rhône situés à cette époque dans la plaine alluviale au pied du fort Saint-André sont en cours de remblaiement (par déplacement du chenal principal vers la rive gauche). Le croisement entre les données sédimentologiques, électriques et cartographiques nous permet de resituer, dans le cadre chronostratigraphique, les phases de remblaiement de cette partie de la plaine alluviale au cours

de la fin du PAG. Ainsi, le bras de Villeneuve-lès-Avignon semble avoir été l'objet d'une forte sédimentation entre les XVI^e et XVIII^e s., ce qui a conduit à l'élargissement de la bande active du Rhône puis au déplacement du bras de Villeneuve-lès-Avignon vers l'est et, enfin, à la formation de l'Île (fig. 9A). D'après l'étude diachronique des cartes anciennes, la position des îles semble être très variable au cours du PAG et traduit une forte mobilité des formes alluviales au sein de la bande active du fleuve. Le remblaiement progressif de cette partie de la plaine alluviale est mis en évidence par la présence de marais (US6, fig. 6 ; UGEc, fig. 7) sur les cartes anciennes (fig. 9A). Cela est confirmé par la présence de dépôts limono-argileux dans les carottages et la zone plus conductrice à l'ouest du profil électrique AVI 07. Notre travail permet donc de faire coïncider l'abandon du pont avec une période de forte mobilité des chenaux actifs du Rhône qui semblent se décaler de plus en plus vers l'est entre la fin du XVII^e et le début du XVIII^e s (fig. 9A). La sédimentation alluviale ne semble pas strictement sous contrôle climatique. Les aménagements hydrauliques ont pu modifier localement cette dynamique notamment en favorisant la formation de l'Île de la Barthelasse par la réunion de plusieurs bancs sableux. Les données de l'iconographie montrent aussi que la position des îles dans le Rhône au niveau d'Avignon est favorisée par la position des piles du pont. Les causes de cette importante mobilité au cours de la fin du PAG ont été reliées par la plupart des auteurs à la recrudescence des fortes crues à partir de la fin du XIV^e s. Enfin, avec la construction de digues à partir de 1840-1860 puis des ouvrages destinés à approfondir le chenal, seule la charge en suspension atteint désormais la plaine alluviale de façon exceptionnelle. Les limons récents (US7, fig. 6 ; UGEc, fig. 7), qui présentent une forte pédogenèse au sommet du remblaiement alluvial, se déposent à partir de cette période. Leur épaisseur estimée ici entre 1 et 1,5 m, est conforme aux données connues sur le Rhône aval (Provansal *et al.*, 2010, 2012).

Conclusions

Cet article se fonde sur une approche pluridisciplinaire pour restituer, pour la première fois dans le secteur d'Avignon, la dynamique de sédimentation à l'époque moderne (XV^e s.-actuel) et permet aussi de proposer un tracé supposé du pont Saint-Bénézet. Les résultats obtenus, en combinant des méthodes et techniques de géographie historique, de relevés bathymétriques, de prospections géoélectriques et de carottages, mettent en évidence l'existence d'un ancien tracé du Rhône au pied du fort Saint-André (1 km au nord du pont d'Avignon) entre le XV^e et la première moitié du XVIII^e s. Ce chenal a connu une forte mobilité spatiale en un laps de temps assez court et a probablement amené les constructeurs à surélever très tôt le pont, comme en témoignent les différents niveaux de tablier qui sont mis en évidence par l'étude de la chapelle. Les documents anciens établis au cours des Temps Modernes, dont la richesse en informations géomorphologique et architecturale a fortement fluctué, permettent néan-

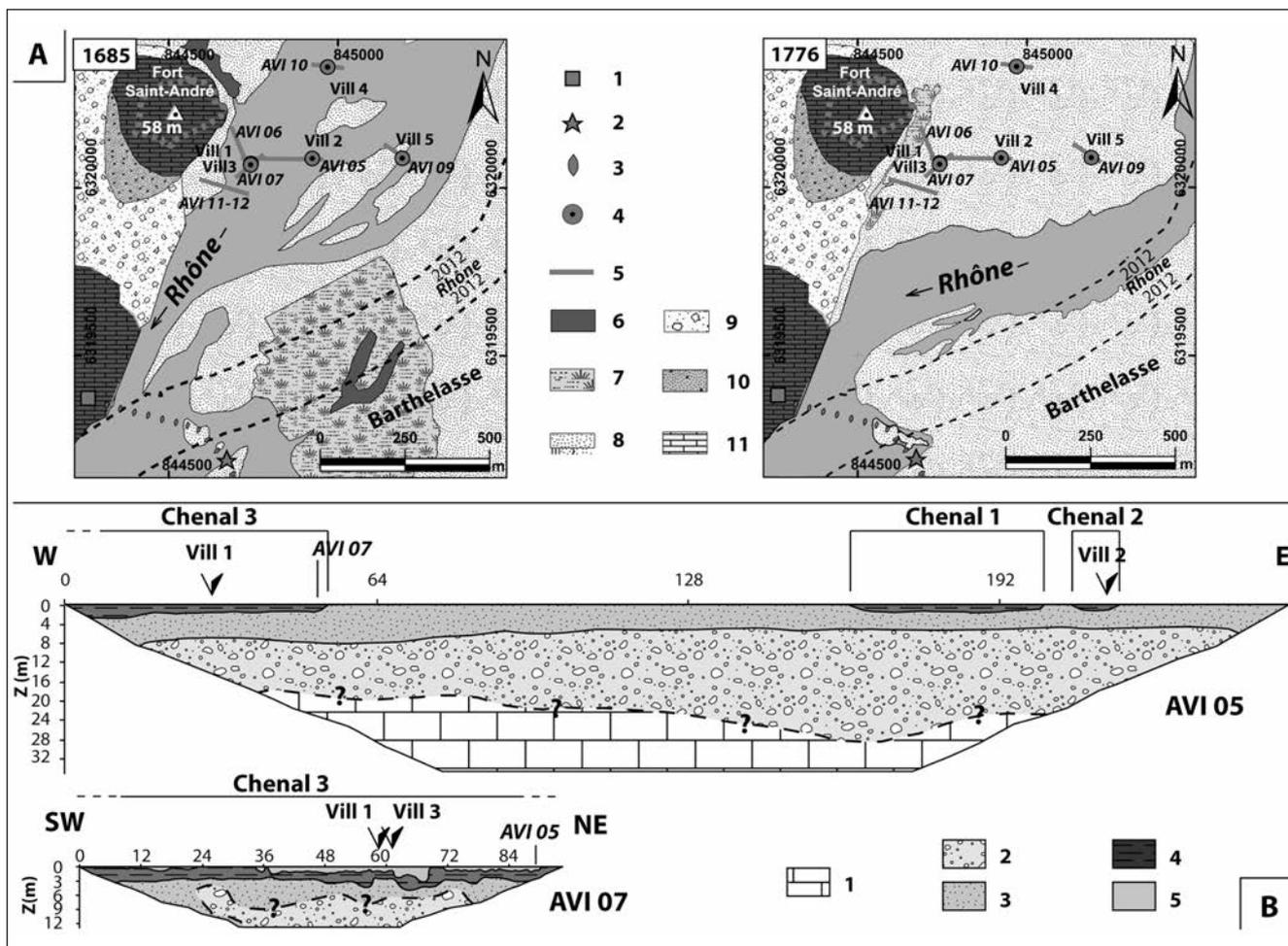


Fig. 9 – Proposition de restitution de la mobilité du bras de Villeneuve (Rhône) dans le secteur du fort Saint-André au cours des XVII^e et XVIII^e s. Interprétations stratigraphique de la plaine alluviale du Rhône du côté de Villeneuve-lès-Avignon. A : Evolution morphologique de la plaine alluviale du côté de Villeneuve-lès-Avignon entre 1685 et 1776. 1 : tour Philippe-le-Bel ; 2 : pile restante du pont Saint-Bénézet ; 3 : piles restituées par cette étude ; 4 : carottages réalisés dans le cadre de cette étude ; 5 : profils TRE ; 6 : paléochenaux ; 7 : marais ; 8 : plaine alluviale holocène ; 9 : colluvions quaternaires ; 10 : grès et sables (Miocène) ; 11 : calcaires (Barrémien). B : Interprétation du remblaiement sédimentaire de la plaine alluviale du côté de Villeneuve-lès-Avignon d’après les profils électriques AVI 06 et AVI 07 et les carottages Vill 1, Vill 2, Vill 3, Vill 4 et Vill 5. 1 : calcaires (Barrémien) ; 2 : galets ; 3 : sables ; 4 : argiles ; 5 : limons récents.

Fig. 9 – Proposed reconstruction of the lateral mobility of the Rhone River (Villeneuve-lès-Avignon channel) in the area of the Saint-André Fort during the 17th and the 18th Centuries. Stratigraphic interpretation of the Rhone river alluvial plain on the Villeneuve-lès-Avignon side. A : Morphological evolution of the alluvial plain on Villeneuve-lès-Avignon side from 1685 to 1776. 1 : Philippe-le-Bel Tower ; 2 : remnant pile of the Saint-Bénézet Bridge ; 3 : proposed location of the piles ; 4 : boreholes drilled within the framework of the present article ; 5 : ERT profiles location of the Infoterre Geological drillholes database ; 6 : palaeochannels ; 7 : swamps ; 8 : Holocene alluvial plain ; 9 : Quaternary colluviums ; 10 : sandstone and sand (Miocene) ; 11 : limestone (Barremian). B : Interpretation of the sedimentary infill within the alluvial plain on Villeneuve-lès-Avignon side based on the derivation of AVI 06 AVI 07 ERT profiles and on the boreholes data of Vill 1, Vill 2, Vill 3, Vill 4, and Vill 5. 1 : limestone (Barremian) ; 2 : pebbles ; 3 : sand ; 4 : clay ; 5 : recent silt.

moins de juger d’une évolution majeure du bras de Villeneuve à partir du milieu du XVII^e s. avec un déplacement progressif vers l’est jusqu’à la fin du XIX^e s. où il acquiert son tracé quasi actuel. Une phase de forte sédimentation sableuse s’est opérée entre les XV^e et XVIII^e s. où des sables moyens à grossiers se sont accumulés sur près de 5 m par endroits. Il est évident que la récurrence des crues, de même que l’exhaussement rapide du plancher alluvial et la mobilité des bancs, ont contribué à endommager le pont Saint-Bénézet, nécessitant toujours plus de travaux de rehaussement.

Le coût de ces rénovations régulières a dû être un frein à son entretien et a certainement dû précipiter son abandon.

L’obtention de données chronologiques par le radiocarbone dans le cadre de cet article n’est pas encore suffisante pour dater précisément les différentes unités et il conviendra notamment de préciser l’âge de l’unité de galets identifiée dans tous les carottages. De même, il sera important de quantifier et de préciser l’apport sédimentaire important observé au cours des XVI^e et XVII^e s. et de déterminer la part liée à l’érosion des terrains du Massif Central et des Alpes

afin de mettre en évidence des secteurs érodés préférentiellement selon les périodes et d'en estimer les volumes de sédiments mobilisés. La chronostratigraphie et l'évolution du système fluvial du secteur d'Avignon sont cohérents avec l'ensemble des données déjà connues dans le bassin du Rhône, en amont (Bravard, 2004 ; Salvador *et al.*, 2005 ; Reynard *et al.*, 2009) et en aval (Arnaud-Fassetta, 2003, 2004 ; Antonelli *et al.*, 2004b ; Vella *et al.*, 2005 ; Maillat *et al.*, 2007, Provansal *et al.*, 2010) et, plus largement, sur les fleuves d'Europe occidentale (Brown, 1997 ; Burnouf et Leveau, 2004 ; Hoffmann *et al.*, 2009 ; Salomon *et al.*, 2010). Ils apportent un éclairage précis de l'évolution de ce secteur au cours du PAG, avant la domestication imposée au fleuve à partir du milieu du XIX^e s.

Remerciements

Cet article est une contribution au programme de recherches PAVAGE (2010-2013), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (programme blanc, département InSHS) et dirigé par Michel Berthelot. Les auteurs tiennent à remercier en premier lieu les services culturels et techniques de la mairie de Villeneuve-lès-Avignon pour leur soutien permanent et pour avoir facilité la réalisation des carottages et des profils géoélectriques dans la plaine Labadie (secteur sud), nous adressons en particulier nos vifs remerciements à MM. Marc Andrieu et Jacques Lafolie. En deuxième lieu, Laetitia Sinibaldi (CEREGE) et David Psomiadis (CEREGE) sont chaleureusement remerciés pour avoir contribué à la réalisation des carottages durant les mois de novembre 2011 et de février 2012. Les discussions menées avec Georges Pichard et Emeline Roucaute ont permis d'améliorer la qualité de cet article et nous leur exprimons ici toute notre gratitude. Enfin, nous tenons à remercier les trois relecteurs anonymes pour leurs remarques et suggestions constructives ainsi que le rédacteur en chef de la Revue, Gilles Arnaud-Fassetta, pour ses conseils avisés.

Références

- Alkema D., Middelkoop H. (2007)** – The influence of floodplain compartmentalization on flood risk within the Rhine - Meuse delta. In: Flood risk management in Europe: innovation in policy and practice. / ed by S. Begum, M.J.F. Stive, and J.W. Hall. Berlin: Springer, 2007. (Advances in natural and technological hazards research : 25) ISBN: 978-1-4020-4199-0. pp. 21-42.
- Allinne C. (2007)** – Les villes romaines face aux inondations. La place des données archéologiques dans l'étude des risques fluviaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 1, 61-78.
- Antonelli C., Provansal M., Fleury J., Pichard G. (2004a)** – Analyse de l'évolution séculaire du lit du Rhône à Arles à partir de l'analyse d'image. Implications géomorphologiques et paléohydrologiques. *Méditerranée*, 1-2, 135-142.
- Antonelli C., Provansal M., Vella C. (2004b)** – Recent morphological channel changes in a deltaic environment. The case of the Rhône River, France. *Geomorphology* 57, 385-402.
- Arnaud F., Revel M., Chapron E., Desmet M., Tribouvillard N. (2005)** – 7200 years of Rhône flooding activity in Lake le Bourget, France: a high-resolution sediment record of NW Alps Hydrology. *The Holocene* 15-3, 420-428.
- Arnaud-Fassetta G. (2000)** – *Quatre mille ans d'histoire hydrologique dans le delta du Rhône. De l'Âge du Bronze au siècle du nucléaire.* Grafigéo, 11, Collection mémoires et documents de l'UMR PRODIG, Paris, 229 p.
- Arnaud-Fassetta G. (2003)** – 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. *Catena* 51, 141-172.
- Arnaud-Fassetta G. (2004)** – The upper Rhône Delta sedimentary record in the "Arles-Piton" core: analysis of delta-plain subenvironments, avulsion frequency, aggradation rate and origin of sediment yield. *Geografiska Annaler A – Physical Geography* 86, 4, 367-383.
- Arnaud-Fassetta G., Provansal M. (1999)** – High frequency variations of water flux and sediment discharge during little ice age in the Rhone delta (France). Relationship to the catchment area. *Hydrobiologia*, 410, 241-250.
- Arnaud-Fassetta G., De Beaulieu J.-L., Suc J.-P., Provansal M., Williamson D., Leveau P., Aloïsi J.-C., Gadel F., Giresse P., Evin J., Duzer D. (2000)** – Evidence for an early landuse in the Rhône Delta (Mediterranean France) as recorded by late Holocene fluvial paleoenvironments (1640-100 BC). *Geodinamica Acta* 13, 377-389.
- Arnaud-Fassetta G., Bruneton H., Berger J.-F., Beaudouin C., Boès X., Provansal M. (2005)** – A ~8000-yr record of palaeohydrology and environmental change in fluvial-influenced sediments from the urban Arles-Piton core, upper Rhône Delta, France. *Zeitschrift für Geomorphologie* 49, 4, 455-484.
- Beauvais A., Ritz M., Parisot J.-C., Bantsimba C., Dukhan M. (2004)** – Combined ERT and GPR methods for investigating two stepped lateritic weathering systems. *Geoderma* 119, 121-132.
- Berger J.-F. (1996)** – Climat et dynamique des agrosystèmes dans la moyenne vallée du Rhône. In Fiches J.-L. (Ed.) *Le 3^e siècle en Gaule Narbonnaise.* Editions ACPCA, Sophia Antipolis, 299-332.
- Bravard J.-P. (1989)** – La métamorphose des rivières des alpes françaises à la fin du Moyen Age et à l'Epoque Moderne. *Revue de Géographie de Liège* 25, 145-157.
- Bravard J.-P. (2004)** – Le risque d'inondation dans le bassin du Haut Rhône : quelques concepts revisités dans une perspective géohistorique. In Burnouf J., Leveau P. (Eds.) *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture. Sociétés préindustrielles et milieux fluviaux, lacustres et palustres : pratiques sociales et hydrosystèmes.* CTHS, Paris, 397-408.
- Bravard J.-P. (2010)** – Discontinuities in braided patterns: the River Rhône from Geneva to the Camargue delta before river training. *Geomorphology* 117, 3-4, 219-233.
- Bravard J.-P., Provansal M. (2011)** – Le franchissement du Rhône antique (France), Métamorphoses fluviales et première esquisse taphonomique à l'échelle de la vallée. In *Les Ponts routiers de la gaule romaine. Revue Archéologique de Narbonnaise*, supplément 41. Presses Universitaires de la Méditerranée, Montpellier, 431-443.
- Bravard J.-P., Provansal M., Arnaud-Fassetta G., Chabert S., Gaydou P., Dufour S., Richard F., Valleteau S., Melun G., Passy P. (2008)** – Un atlas du paléoenvironnement de la plaine

- alluviale du Rhône de la frontière suisse à la mer. *Collections EDYTEM*, Cahiers de paléoenvironnement, 6, 101-116.
- Breton A. (1987)** – Les restaurations du pont Saint-Bénézet. *Annuaire de la Société des Amis du Palais des Papes et des monuments d'Avignon*, 87-94.
- BRGM (2012)** – BSS Banque de données du sous-sol BRGM. <http://infoterre.brgm.fr>.
- Brown A.G. (1997)** – *Alluvial geoarchaeology, floodplain archaeology and environmental change*. Cambridge University Press, Cambridge, 377 p.
- Bruneton H. (1999)** – *Evolution holocène d'un hydrosystème nord-méditerranéen et de son environnement géomorphologique. Les plaines d'Arles*. Thèse de géographie, université Aix-Marseille 1, 363 p.
- Bruneton H., Arnaud-Fassetta G., Provansal M., Sistach D. (2001)** – Geomorphological evidence for fluvial change during the Roman period in the lower Rhône valley (southern France). *Catena* 45-4, 287-312.
- Burnouf J., Leveau P. (Eds.) (2004)** – *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture. Sociétés préindustrielles et milieux fluviaux, lacustres et palustres : pratiques sociales et hydrosystèmes*. Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris, 493 p.
- Buurman P., Pape T., Muggler R.C.C. (1996)** – Laser grain-size determination in soil genetic studies: Practical problems. *Soil Science* 162, 211-218.
- Carozza J.-M., Puig C., Odiot T., Valette P., Passarius O. (2011)** – Lower Mediterranean plain accelerated evolution during the Little Ice Age: geoarchaeological insight in the Tech basin (Roussillon, Gulf of lion, Western Mediterranean). *Quaternary international* 30, 1, 1-11.
- Carru D. (1999)** – Le Rhône à Avignon. Données archéologiques. *Gallia*, 56, 109-120.
- CNR (1965)** – *Aménagement de la chute de Vallabrègue, Pont Saint-Bénézet, sondages de reconnaissance : plan et profil*. Dossier : 643a, 1 p.
- CNR (1970)** – *Ruines du Pont Saint-Bénézet subsistant dans le bras de Villeneuve*. Dossier AV 70 33, 26 p.
- Debret M., Chapron E., Desmet M., Rolland-Revel M., Magand O., Trentesaux A., Bout-Roumazeille V., Nomade J., Arnaud F. (2010)** – North western Alps Holocene paleohydrology recorded by flooding activity in Lake Le Bourget, France. *Quaternary Science Reviews* 29, 2185-2200.
- Delahaye E. (2004)** – La dialectique des villes et du Rhône à l'aval de Lyon : des villes malgré le fleuve ? Urbanisation et contrainte fluviale. *Géocarrefour*, 79/1, 85-93.
- Deng C., Shaw J., Liu Q., Pan Y., Zhu R. (2006)** – Mineral magnetic variation of the Jingbian loess/paleosoil sequence in the northern Loess Plateau of China: implications for Quaternary development of Asian aridification and cooling. *Earth and Planetary Science Letters* 241, 248-259.
- Eyre J.K., Shaw J. (1994)** – Magnetic enhancement of chinese loess, the role of $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$? *Geophysical Journal International* 117, 265-271.
- Fassbinder J., Stanjek H., Vali H. (1990)** – Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature* 343, 161-163.
- Fialova H., Maier G., Petrovsky E., Kapicka A., Boyko T., Scholger R. (2006)** – Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings. *Journal of Applied Geophysics* 59, 273-283.
- Ghilardi M., Kunesch S., Styllas M., Fouache E. (2008)** – Reconstruction of Mid-Holocene sedimentary environments in the central part of the Thessaloniki Plain (Greece), based on microfaunal identification, magnetic susceptibility and grain-size analyses. *Geomorphology* 97, 3-4, 617-630.
- Ghilardi M., Psomiadis D., Cordier S., Delanghe-Sabatier D., Demory F., Hamidi F., Paraschou T., Dotsika E., Fouache E. (2012)** – The impact of rapid early- to mid-Holocene Palaeoenvironmental changes on Neolithic settlement at NeaNikomideia, Thessaloniki Plain, Greece. *Quaternary International* 266, 47-61.
- Griffiths D.H., Turnbull J., Olayinka A.I. (1990)** – Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. *First Break* 8, 121-129.
- Hoffmann T., Erkens G., Gerlach R., Klostermann J.E.M., Lang A. (2009)** – Trends and controls of Holocene floodplain sedimentation in the Rhine catchment. *Catena* 77, 96-106.
- Jacob-Rousseau N. (2010)** – Des archives aux paysages : milieux, dynamiques, territoires. Editorial au numéro spécial. *Géocarrefour*, 85, 1, 3-5.
- Jorda M., Roditis J.-C. (1994)** – Les épisodes de gel sur le Rhône depuis l'An Mil. Périodisation, fréquence, interprétation climatique. *Méditerranée*, 3-4, 19-30.
- Laigre L., Reynard E., Arnaud-Fassetta G., Baron L., Glenz D. (2012)** – Caractérisation de la paléodynamique du Rhône en Valais central (Suisse) à l'aide de la tomographie de résistivité électrique. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 4, 405-426.
- Landon N. (1999)** – *L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen. Constat régional et analyse d'un hydrosystème complexe, la Drôme*. Thèse, université Paris-Sorbonne (Paris 4), 2 volumes, 560 p.
- Le Borgne E. (1955)** – Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Annales de Géophysique*, 11, 399-419.
- Leroy-Ladurie E. (1983)** – *Histoire du climat depuis l'An Mil*. Flammarion, Paris, 2 volumes, 544 p.
- Loke M.H., Barker R.D. (1996)** – Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospection* 44, 131-152.
- Maillet G.M., Rizzo E., Revil A., Vella C. (2005)** – High resolution electrical resistivity tomography (ERT) in a transition zone environment: Application for detailed internal architecture and infilling processes study of a Rhone River paleo-channel. *Marine Geophysical Researches* 26, 2-4, 317-328.
- Maillet G., Raccasi G., Provansal M., Sabatier F., Antonelli C., Fleury J. (2007)** – Transferts sédimentaires dans le bas Rhône depuis le milieu du 19^e siècle. *Revue de géographie physique et Quaternaire*, 61, 1, 39-54.
- Marié D.-M. (1953)** – *Le Pont Saint-Bénézet. Etude historique et archéologique d'un ouvrage en partie disparu. Tome I : Histoire et réalité* (t. II non publié).
- Marmet E. (2000)** – *Cartographie à large maille de la susceptibilité magnétique du sol pour une évaluation archéologique sur les grands tracés*. Thèse, université Pierre & Marie Curie (Paris 6), 237 p.
- Marmet E., Bina M., Fedroff N., Tabbagh A. (1999)** – Relationship between human activity and the magnetic properties of

- soils: a case study in the Medieval site of Roissy in France. *Archaeological Prospection* 6, 161-170.
- Marmottan N. (1964)** – *Le Pont d'Avignon. Le Petit Pâtre Bénézet, l'histoire et la légende, la poésie et la chanson*. Mistral, Cavaillon, 112 p.
- Miramont C., Guilbert X. (1997)** – Variations historiques de la fréquence des crues et évolution de la morphogenèse fluviale en moyenne Durance (France du sud-est). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 3, 325-337.
- Patry J. (1966)** – Avignon, chapelle Saint-Nicolas. In *Dictionnaire des églises de France, II D, Alpes-Provence-Corse*. Robert Laffont, Paris, 23.
- Pellicer X.M., Gibson P. (2011)** – Electrical resistivity and Ground Penetrating Radar for the characterisation of the internal architecture of Quaternary sediments in the Midlands of Ireland. *Journal of Applied Geophysics* 75, 638-647.
- Pichard G. (1995)** – Les crues sur le bas Rhône de 1500 à nos jours. Pour une histoire hydroclimatique. *Méditerranée*, 82, 105-116.
- Provansal P., Berger J.-F., Bravard J.-P., Salvador P.-G., Salvador P.G., Arnaud-Fassetta G., Bruneton H., Vèrot-Bourrély A., Arnaud-Fassetta G., Bruneton H., Vèrot-Bourrély A. (1999)** – Le Rhône romain : dynamiques fluviales, dynamiques territoriales, Le régime du Rhône dans l'Antiquité et au Haut Moyen Age. *Gallia*, 56, 13-32.
- Provansal P., Bruneton H., Vella C., Arnaud-Fassetta G., Balais J.-L., Leveau P. (2002)** – Paléo-hydrologie holocène dans la basse vallée du Rhône, d'Orange à la mer. In Bravard J.-P., Magny M. (Eds.) *Les fleuves ont une histoire, paléoenvironnement des rivières et des lacs français depuis 15000 ans*. Editions Errance, Paris, 251-259.
- Provansal M., Villiet J., Eyrolle F., Raccasi G., Gurriaran R., Antonelli C. (2010)** – High resolution evaluation of recent bank accretion rate of the managed Rhone: a case study by multi-proxy approach. *Geomorphology* 117, 3-4, 287-297.
- Provansal M., Ferrand E., Eyrolle F., Raccasi G., Monaco M., Gurriaran R. (2012)** – Spatial variability in sedimentation rates and artificial radionuclide storage in alluvial banks of the lower Rhône River. *Aquatic Sciences* 74, 4, 735-750.
- Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Ramsey B., Buck C.E., Burr G.S., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., McCormac F.G., Manning S.W., Reimer R.W., Richards D.A., Southon J.R., Talamo S., Turney C.S.M., van der Plicht J., Weyhenmeyer C.E. (2009)** – IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50000 years BP. *Radiocarbon* 51, 1111-1150.
- Reynard E., Arnaud-Fassetta G., Laigre L., Schoeneich P. (2009)** – Le Rhône alpin vu sous l'angle de la géomorphologie : état des lieux. In Reynard E., Evéquo-Daven M., Dubuis P. (Eds.) *Le Rhône : dynamique, histoire et société. Cahiers de Vallesia*, Archives de l'Etat du Valais, Sion, 75-102.
- Ritz M., Parisot J.-C., Diouf S., Beauvais A., Diome F., Niang M. (1999)** – Electrical imaging of lateritic weathering mantles over granitic and metamorphic basement of eastern Senegal, West Africa. *Journal of Applied Geophysics* 41, 335-344.
- Rossiaud J. (2007)** – *Le Rhône au Moyen-Âge*. Aubier, collection Historique, Paris, 648 p.
- Rouquette J.-M. (1974)** – Le pont Saint-Bénézet. In *Provence romane I, la Provence rhodanienne*. Zodiaque, La Pierre-qui-Vire, 219-233.
- Sagnier A. (1883)** – Le Pont Saint-Bénézet. In *Congrès archéologique de France*, 259-382.
- Salomon F., Goiran J.-P., Bravard J.-P., Strutt K., Keay S., Earl G.P., Paroli L., Kay S. (2010)** – Chronique. Delta du Tibre. Campagne de carottage 2009. L'exemple de Canale Romano. *Mélanges de l'école française de Rome Antiquité*, 123, 1, 263-267.
- Salvador P.-G. (1991)** – *Le thème de la métamorphose fluviale dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère ; bassin de Malville et ombilic de Moirans, Bas-Dauphiné*. Thèse de géographie et aménagement, université Lyon 3, 498 p.
- Salvador P.-G., Berger J.-B., Fontugne M., Gauthier E. (2005)** – Etudes des enregistrements sédimentaires holocènes des paléoméandres du Rhône dans le secteur des Basses Terres (Ain, Isère, France). *Quaternaire*, 16, 4, 315-328.
- Tite M.S., Mullins C. (1971)** – Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites. *Archaeometry* 13-2, 209-219.
- Van Dam R.L. (2012)** – Landform characterization using geophysics—Recent advances, applications, and emerging tools. *Geomorphology* 1, 57-73.
- Vannière B., Bossuet G., Gauthier E. (2000)** – Susceptibilité magnétique et indices polliniques, marqueurs de l'impact anthropique et de la dynamique fluviale dans la basse vallée du Doubs (Jura, France) entre le I^{er} et le VIII^e siècles après J.-C. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de la Terre et des planètes*, 331, 203-210.
- Vella C., Fleury T.J., Raccasi G., Provansal M., Sabatier F., Bourcier M. (2005)** – Evolution of the Rhône delta plain in the Holocene. *Marine Geology* 222-223, 235-265.
- Vella M.A. (2010)** – Approches géomorphologiques et géophysiques des interactions sociétés/milieus en Corse au cours de l'Holocène. Thèse, université de Corse, 2 volumes, 314 p.
- Weston D.G. (2004)** – The influence of waterlogging and variations in pedology and ignition upon resultant susceptibilities: a serie of laboratory reconstructions. *Archaeological Prospection* 11, 107-120.

Article soumis le 16 septembre 2012, accepté le 15 avril 2013.