

## Dynamique hydrogéomorphologique et diversité végétale dans le delta du Rhône (France) de -10 000 ans à demain

Gilles ARNAUD-FASSETTA, Jean-Pierre SUC

### Introduction et rappel de la problématique

Le delta du Rhône représente aujourd'hui une vaste plaine de niveau de base dont la surface est estimée à 1742 km<sup>2</sup> (fig. 1). Ancrée entre les deux bras du Rhône, la «Grande Camargue» n'en constitue que la moitié à peine (850 km<sup>2</sup>). La présente étude vise à retracer l'histoire hydrogéomorphologique et végétale du «grand delta» à l'échelle de l'Holocène<sup>1</sup>.

Dans le delta du Rhône, les écosystèmes végétaux sont très bien connus. La diversité végétale y est élevée malgré l'absence de relief: plus de 1000 espèces recensées parmi les plantes à fleurs pour un total de 4700 espèces habitant la France. La végétation actuelle est fortement dépendante non seulement des paramètres climatiques globaux, mais aussi du milieu local, en particulier de la teneur en sel des eaux de surface et de sub-surface, et des actions humaines<sup>2</sup>.

L'évolution de la plaine deltaïque, dont les principaux prismes sédimentaires ont été édifiés en moins de 6000 ans, dans un contexte de fluctuations plus ou moins marquées du niveau de la mer, des apports alluvionnaires et d'occupation/utilisation des sols, a forcément eu une incidence sur la dynamique végétale et la biodiversité en général. Il nous a donc paru utile de reprendre les étapes de l'édification du delta du Rhône, à la lumière des travaux de quelques-uns de nos prédécesseurs<sup>3</sup>, enrichis et complétés par les données stratigraphiques acquises plus récemment, et

<sup>1</sup> Les précédents travaux n'avaient permis d'en apprécier la construction qu'à l'échelle des trois ou quatre derniers millénaires (Gilles ARNAUD-FASSETTA, *Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône*, Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille 1), 1998; Gilles ARNAUD-FASSETTA, *Quatre mille ans d'histoire hydrologique dans le delta du Rhône. De l'âge du bronze au siècle du nucléaire*, Paris, 2000, sans envisager un lien étroit avec l'évolution de la diversité végétale. Le présent travail est à replacer dans la perspective de l'étude intégrée, coordonnée par l'un d'entre nous (J.-P. Suc) et financée par l'Institut Français de la Biodiversité (IFB), portant sur la dynamique de la diversité végétale en Camargue depuis 6000 ans (Jean-Pierre SUC *et al.*, *Un atelier exceptionnel d'étude de la dynamique de la diversité végétale: la Camargue d'il y a 6000 ans à demain*, Programme de recherche «Biodiversité et Changement global», Institut Français de la Biodiversité, rapport final, 2006.)

<sup>2</sup> COLLECTIF CAMARGUE, *Etude hydrogéologique, pédologique et de salinité. Dynamique du remblaiement flandrien*, DDA et CNA du Bas-Rhône et du Languedoc-Arles, 1970; Armand PONS, Claude TONI, Hélène TRIAT, «Édification de la Camargue et histoire holocène de sa végétation», dans *Ecologie (La Terre et la Vie)*, 2 (1979), p. 13-30.

<sup>3</sup> R. LAGAARJ, F. P. H. W. KOPSTEIN, «Typical features of a fluvio-marine offlap sequence», dans L. M. J. U. VAN STRAATEN (éd.), *Deltaic and shallow marine deposits*, Amsterdam, 1964, p. 216-226; COLLECTIF CAMARGUE, *Etude hydrogéologique, pédologique et de salinité*, Eppo OOMKENS, «Depositional sequences and sand distribution in the postglacial Rhône delta complex», dans James MORGAN (éd.), *Deltaic Sedimentation: Modern and Ancient*, Oomkens, 1970, p. 198-212; Jean-Claude ALOÏSI, Christiane DUBOUL-RAZAVET, «Deux exemples de sédimentation deltaïque actuelle en Méditerranée: les deltas du Rhône et de l'Ebre», dans *Bulletin du Centre de Recherches de Pau*, 8, 1 (1974), p. 227-240; PONS *et al.*, «Édification de la Camargue et histoire holocène de sa végétation»; Alain L'HOMER *et al.*, «Principales étapes de l'édification du delta du Rhône de 7000 BP à nos jours; variations du niveau marin», dans *Oceanis*, 7, 4 (1981), p. 389-408.

surtout grâce aux jalons chronologiques apportés par les trouvailles archéologiques et les datations <sup>14</sup>C, qui souvent avaient fait défaut dans les études antérieures.

## Cadre physique et humain de l'étude

### *Le Rhône et son bassin versant*

Le delta du Rhône constitue l'aboutissement d'un vaste bassin versant (97 800 km<sup>2</sup>), l'un des plus grands d'Europe (fig. 1A). Des Alpes suisses à la Méditerranée, le Rhône et ses affluents drainent des unités de bassin aux caractéristiques géologiques et hydroclimatiques variées. De type méditerranéen atténué, le régime hydrologique du Rhône aval est caractérisé par des hautes eaux de novembre à mai, qui conditionnent le cycle saisonnier des nappes phréatiques du lit majeur. Ainsi, le Rhône ne connaît pas d'étiages marqués (en moyenne 600 m<sup>3</sup>/s) et son module (1701 m<sup>3</sup>/s) reste élevé.

La contribution des derniers affluents (alpins ou cévenols) à caractère souvent « torrentiel » apparaît déterminante sur son régime hydrosédimentaire<sup>4</sup>. La Durance et le Gardon sont sujets à de fortes crues d'automne et de printemps qui fournissent une charge sédimentaire abondante<sup>5</sup>. Dans le cas de l'Ardèche, affluent de rive droite dont le débit peut atteindre 6000 m<sup>3</sup>/s en période de grosse crue, on sait que ses eaux très chargées en sédiments sont venues barrer à maintes reprises les eaux du Rhône, accumulant une partie de ses alluvions sur la rive opposée du fleuve<sup>6</sup>.

La mise en charge généralisée du bassin versant peut être à l'origine d'événements hydroclimatiques exceptionnels (crues centennales) à très vaste champ d'inondation, susceptibles de remodeler ou de déplacer le lit fluvial<sup>7</sup>. De tels aléas se sont produits en 2003, 1993-1994 et 1840 ainsi qu'en 1856 (11 640 m<sup>3</sup>/s), date à laquelle fut atteinte l'extrême limite historique de la plaine d'inondation<sup>8</sup>.

A l'échelle du bassin versant, le bilan d'érosion dérivé de la quantification des apports solides du Rhône à la mer a beaucoup évolué. Au cours du siècle dernier, la charge solide annuelle était estimée à 21 millions de tonnes (Mt)<sup>9</sup>. Depuis, le volume des sédiments amenés à la mer se serait fortement réduit (70-80%), en raison de la fin de la crise du Petit Âge Glaciaire, puis des travaux de régularisation du fleuve et des équipements hydroélectriques<sup>10</sup>.

<sup>4</sup> Nicolas JACOB *et al.*, «Les formes alluviales d'une rivière en gorge, le Chassezac (Cévennes, France)», dans *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1 (2006), p. 3-21.

<sup>5</sup> Didier PONT, Jean-Pierre SIMMONET, Anne-Véronique WALTER, «Medium-term changes in suspended sediment delivery to the ocean: consequences of catchment heterogeneity and river management (Rhône River, France)», dans *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 54 (2002), p. 1-18.

<sup>6</sup> Jacques BETHEMONT, *Géographie de la Méditerranée*, Paris, 1999.

<sup>7</sup> Gilles ARNAUD-FASSETTA, «Dyke breaching and crevasse-splay sedimentary sequences of the Rhône Delta, France, caused by extreme river-flood of December 2003», dans *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 36, 1 (2013), p. 7-26.

<sup>8</sup> Maurice PARDE, *Fleuves et rivières*, Paris, 1968.

<sup>9</sup> Alexandre SURELL, *Mémoire sur l'amélioration des embouchures du Rhône*, Nîmes, 1847.

<sup>10</sup> Gilles ARNAUD-FASSETTA, «River channel changes in the Rhône Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management», dans *Catena*, 51 (2003), p. 141-172; Mireille PROVANSAL *et al.*, «The geomorphic evolution and sediment balance of the lower Rhône River (southern France) over the last 130 years: Hydropower dams versus other control factors», dans *Geomorphology*, 219 (2014), p. 27-41.

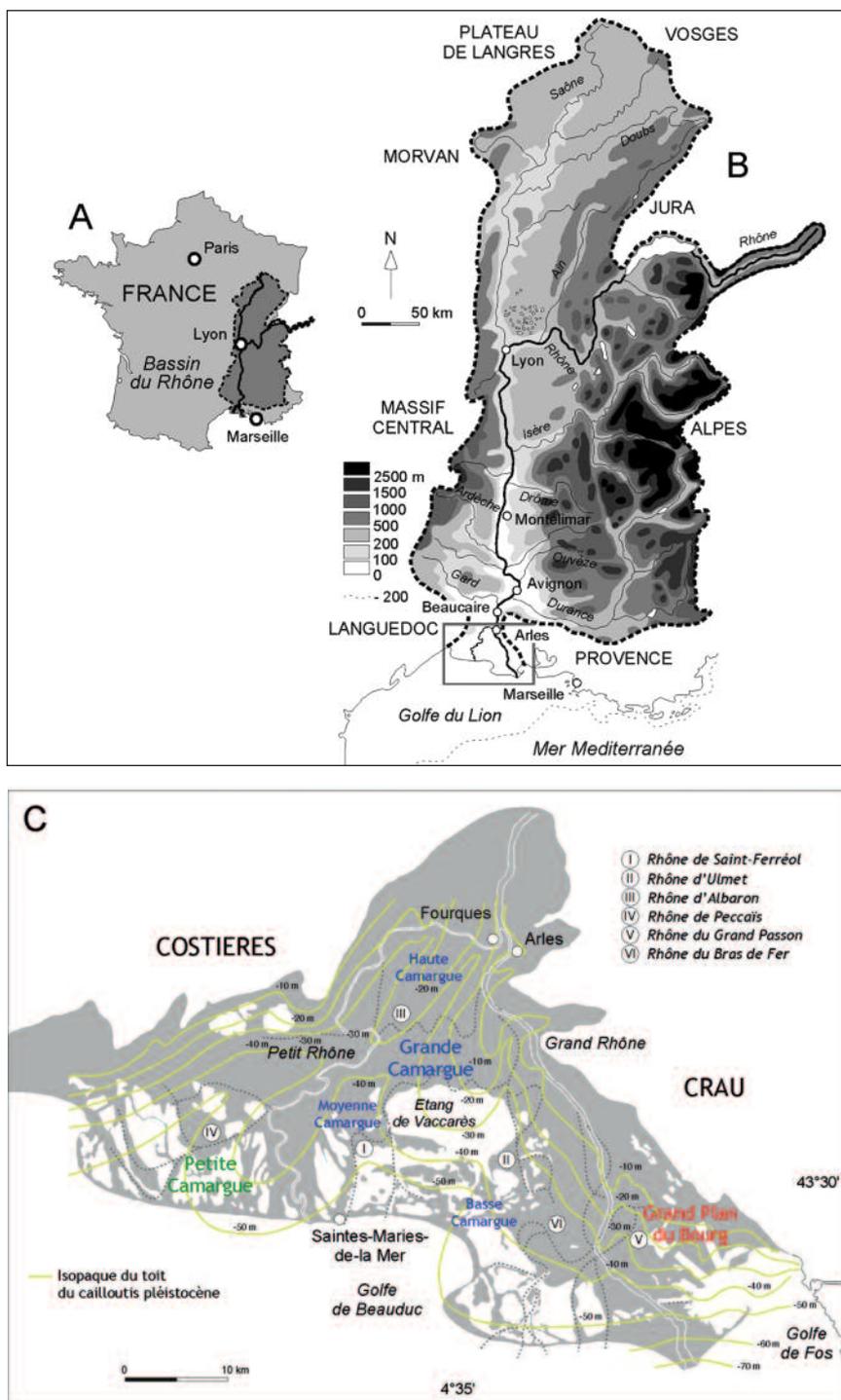


Fig. 1. Caractéristiques physiques du bassin versant (A et B) et du delta du Rhône (C).

Dans le delta, les flux solides du Rhône seraient aujourd'hui de 9 Mt/a, avec des variations de 2,6 à 2,7 Mt suivant les années<sup>11</sup>. L'essentiel (64%) du matériel sédimentaire transiterait dans le fleuve lors des crues supérieures à 3000 m<sup>3</sup>/s, soit en moins de 36 jours<sup>12</sup>. En raison des endiguements, seulement 30 000 t/a entreraient dans l'île de Camargue grâce aux pompes pour l'irrigation<sup>13</sup>.

### *Mise en place et spécificités de la plaine deltaïque*

Le delta du Rhône débute en amont d'Arles (fig. 1C). A partir de son apex (Fourques), la réduction de la pente du Rhône, qui passe de 0,09-0,03% à moins de 0,002%, favorise l'aggradation et l'élargissement du lit majeur, mais tend également à maintenir l'aquifère alluvial en position haute, favorisant ainsi le développement des paluds dans les parties les plus déprimées de la plaine d'inondation.

Dans la plaine deltaïque, le fleuve est divisé en deux bras. Le Grand Rhône (long de 50 km) est le plus important (85-90% du flux liquide). Son chenal actuel sub-rectiligne, presque complètement endigué, se jette à la mer par le Grau de Roustan. Sa profondeur moyenne, d'une dizaine de mètres, diminue vers l'embouchure (environ 4 m), ce qui l'empêche d'être navigable jusqu'à la mer par les bateaux à fort tirant d'eau. Sa largeur varie entre 150 m à Arles et moins d'1 km à son embouchure. Quasiment endigué jusqu'à la mer, le Petit Rhône aboutit au Grau d'Orgon après un tracé sinueux ou méandrique de 60 km. Dans les deux branches du delta, les remontées de sel (coin salé) peuvent se produire lors des phases d'étiage prononcées (août-septembre), lorsque le débit est inférieur à 1000 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire<sup>14</sup>.

Les deux bras délimitent trois unités physiographiques: à l'ouest, la Petite Camargue, au centre, la Grande Camargue, et à l'est, le Grand Plan du Bourg. Ces unités structurent *de facto* le paysage deltaïque. Aujourd'hui, les «hauts reliefs» [3 à 5 m NGF (nivellement général français)] du delta du Rhône correspondent aux «montilles», aux levées alluviales ou aux cordons littoraux holocènes qui forment un quadrillage irrégulier, orienté grossièrement est-ouest et nord-sud. Ces levées alluviales sont propices au stockage de l'eau douce (pluies hivernales, eaux fluviales) lorsque les sables qui les constituent reposent sur des limons imperméables.

<sup>11</sup> Christelle ANTONELLI, *Flux sédimentaires et morphogénèse récente dans le chenal du Rhône aval*, Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille I), 2002 (non publié).

<sup>12</sup> PONT *et al.*, «Medium-term changes in suspended sediment delivery to the ocean».

<sup>13</sup> Pierre HEURTEAUX, Odile CROMBÉ, Claude TONI, «Essai de quantification de l'eau d'irrigation introduite en Grande Camargue notamment pour la riziculture», dans *Ecologia Mediterranea*, 18 (1992), p. 31-48.

<sup>14</sup> Pierre HEURTEAUX, «La Camargue et le Rhône, les usages de l'eau et du fleuve», dans *Courrier du Parc*, 41-42 (1993), p. 18-29; Gilles ARNAUD-FASSETTA, David QUISSENE, Christelle ANTONELLI, «Downstream grain-size distribution of surficial bed material and its hydro-geomorphological significance in a large and regulated river: The Rhône River in its delta area (France)», dans *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1 (2003), p. 33-50.

Les nappes dulçaquicoles lenticulaires ainsi formées ont favorisé de longue date le développement des linéaires forestiers (ripisylve à peupliers et saules) et l'installation des sites habités sur les bourrelets alluviaux<sup>15</sup>. Plus près de la côte, les cordons littoraux fossiles portent une végétation arbustive (tamaris, genévriers rouges) plus adaptée à la présence du sel dans les nappes. Le contexte climatique actuel méso-méditerranéen connaît un très fort déficit hydrique (précipitations annuelles: 600 mm; évapotranspiration annuelle: 1200 mm), favorisant le développement de lagunes temporaires à végétation halophile basse (la «sansouïre»). L'évaporation estivale assèche les étangs les moins profonds et fait remonter les nappes salées. Si ces dernières permettent l'exploitation industrielle du sel, leur présence est néfaste sur les terres agricoles, qui demandent à être équipées de lourds et complexes moyens d'irrigation pour s'en affranchir.

En fait, l'articulation des paysages s'organise selon plusieurs génératrices, dont la plus importante suit un gradient de salinité globalement croissant vers le sud:

- Au nord, la Haute Camargue s'étend de la diffluence Grand Rhône-Petit Rhône jusqu'à la bordure nord de l'étang de Vaccarès. D'une altitude moyenne comprise entre 1 m et 4,5 m, elle est surtout marquée par la présence d'anciens bourrelets alluviaux plus ou moins sinueux, au sein desquels se juxtaposent des paléochenaux (les «lônes») aujourd'hui remblayés par des sédiments sablo-limoneux, des paléo-berges encore soulignées par de grands arbres hygrophiles et de vastes plaines d'inondation fossiles. Ces bourrelets alluviaux isolent des dépressions fermées pluri-kilométriques occupées par des marais d'eau douce très peu profonds et colonisées par les phragmites. Avant l'endiguement complet des bras du Rhône (vers 1869), ces marais faisaient office d'ultime exutoire pour les eaux de crue. Ils sont aujourd'hui essentiellement alimentés par les pompages au Rhône effectués par les viticulteurs, les riziculteurs et les chasseurs<sup>16</sup>.
- Plus au sud s'étend la Moyenne Camargue, marquée par la présence d'étangs saumâtres peu profonds, séparés par d'anciens cordons littoraux et bourrelets alluviaux. L'étang le plus important reste le Vaccarès dont la superficie, aujourd'hui de 65 km<sup>2</sup>, s'est considérablement accrue depuis la Protohistoire<sup>17</sup> et, surtout, à partir de 1950, par le développement de la céréaliculture rizicole<sup>18</sup>.
- Au sud de l'étang de Vaccarès s'étend la Basse Camargue, caractérisée par la présence d'anciens cordons littoraux envahis par une végétation typique de pins parasols et de genévriers de Phénicie. Culminant à une altitude de 7-8 m (Beauduc), ils alternent avec des lagunes et des étangs saumâtres pouvant encore communiquer avec la mer par des «graus». La surface des étangs se réduit considérablement durant la saison estivale, laissant alors la place aux formations végétales halophiles (notamment à *Salicornia macrostachya*) qui composent la

<sup>15</sup> Gilles ARNAUD-FASSETTA, Corinne LANDURÉ, «Fluvial risk in rural areas from the Greek period to the early Middle Ages: The case of the Rhône delta (France)», dans Gilles ARNAUD-FASSETTA, Nathalie CARCAUD (éd.), *French Geoarchaeology in the 21<sup>st</sup> Century*, Paris, 2015, p. 213-234.

<sup>16</sup> Bernard PICON, «La Camargue», dans Anne CADORET (éd.), *Protection de la nature. Histoire et idéologie. De la nature à l'environnement*, Paris, 1985, p. 52-58.

<sup>17</sup> ARNAUD-FASSETTA, *Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône*.

<sup>18</sup> HEURTEAUX, «La Camargue et le Rhône, les usages de l'eau et du fleuve».

sansouïre<sup>19</sup>. Ces paysages sont hérités de l'histoire «récente» (c'est-à-dire des derniers millénaires) de la construction deltaïque.

La construction du delta du Rhône s'inscrit dans une histoire morphodynamique assez longue et complexe<sup>20</sup>. La basse vallée du Rhône recoupe les structures plissées est-ouest héritées de l'orogénèse pyrénéenne et réactivées par la compression alpine (Montagnette, Arles-Montmajour, Alpilles). Surcreusée lors du paroxysme de la crise de salinité messinienne en raison de l'effondrement du niveau de base de la Méditerranée il y a 5,6 millions d'années<sup>21</sup>, elle est remblayée au Pliocène par un corps sédimentaire argilo-sableux de 1200 m d'épaisseur<sup>22</sup>. Depuis, la déformation tectonique globale (<200 m) observée dans la basse vallée du Rhône est relativement modeste.

Durant les phases froides (bas niveau marin)<sup>23</sup> du Quaternaire vont se mettre en place de vastes nappes alluviales graveleuses, rhodano-duranciennes au nord-ouest, et duranciennes à l'est et sous le delta actuel. A partir de 10 000-9000 BP, ces nappes vont être enfouies sous des unités sédimentaires marines transgressives ou lagunomarinées<sup>24</sup> qui accompagnent la remontée du niveau marin relatif<sup>25</sup>. Ces paraséquences<sup>26</sup> emboîtées à disposition rétrogradante-aggradante occupent la majeure partie du remblaiement deltaïque, dépassant parfois 20 m d'épaisseur dans la partie méridionale du delta<sup>27</sup>. La construction de la plaine deltaïque émergée, aggradante

- 19 René MOLINIER, Jean-Pierre DEVAUX, «Carte phytosociologique de la Camargue», dans *Biologie et Ecologie méditerranéenne*, V, 4 (1978), p. 160-195.
- 20 Emile COLOMB *et al.*, *Notice de la carte géologique d'Istres au 1:50 000*, Orléans, 1975; Alain L'HOMER, *Notice explicative de la carte géologique des Saintes-Maries-de-la-Mer au 1:50 000*, Orléans, 1975; François ARTHAUD, M. OGIER, Michel SÉGURET, «Géologie et géophysique du golfe du Lion et de sa bordure nord», dans *Bulletin du BRGM*, 1-3 (1980), p. 175-193; L'HOMER *et al.*, «Principales étapes de l'édification du delta du Rhône de 7000 BP à nos jours»; Alain L'HOMER, *Notice explicative de la carte géologique d'Arles au 1:50 000*, Orléans, 1987; Christian GORINI, Alain LE MARREC, Alain MAUFFRET, «Contribution to the structural and sedimentary history of the Gulf of Lions (western Mediterranean) from the ECORS profiles, industrial seismic profiles and well data», dans *Bulletin de la Société Géologique de France*, 164, 3 (1993), p. 353-363; Alain L'HOMER, *Notice explicative de la carte géologique du Grau-du-Roi au 1:50 000*, Orléans, 1993; Michel SÉRANNE *et al.*, «Structural style and evolution of the Gulf of Lion Oligo-Miocene rifting: role of the Pyrenean orogeny», dans *Marine and Petroleum Geology*, 12 (1995), p. 809-820.
- 21 Georges CLAUZON *et al.*, «Alternate interpretation of the Messinian salinity crisis: Controversy resolved?», dans *Geology*, 24, 4 (1996), p. 363-366.
- 22 Georges CLAUZON, «Le canyon messinien du Rhône: une preuve décisive du 'desiccated deep-basin model'», dans *Bulletin de la Société Géologique de France*, 24, 3 (1982), p. 597-610.
- 23 Marina RABINEAU *et al.*, «Paleo sea levels reconsidered from direct observation of paleoshoreline position during Glacial Maxima (for the last 500,000 yr)», dans *Earth and Planetary Science Letters*, 252 (2006), p. 119-137.
- 24 Jacques LABEYRIE *et al.*, «Chronologie des niveaux eustatiques sur la côte du Roussillon de -33 000 ans à nos jours», dans *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 282 (1976), p. 349-352.
- 25 Jean-Claude ALOÏSI *et al.*, «Holocene transgression in the golfe du Lion (southwestern France): paleogeographic and paleobotanic evolution», dans *Géographie physique et Quaternaire*, 32 (1978), p. 145-162.
- 26 «Succession de couches sédimentaires, plus ou moins conformes, génétiquement liées et limitées par deux surfaces de ravinement consécutives, induites par les inondations marines. Une paraséquence est l'unité stratigraphique déposée pendant un paracycle eustatique, c'est-à-dire un cycle eustatique de 4<sup>e</sup> ou 5<sup>e</sup> ordre», Glossaire de stratigraphie séquentielle, dans *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 45, 3 (1990), p. 446.
- 27 Bernard GENSOUS, Michel TESSON, «Les dépôts post-glaciaires de la plate-forme rhodanienne: organisation stratigraphique et conditions de mise en place», dans *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 325 (1997), p. 695-701.

et progradante vers la mer, devient possible à partir de 6500 BP, en raison de la décélération de la vitesse de montée de la Méditerranée. Les carottes profondes réalisées sur le pourtour de l'étang de Vaccarès<sup>28</sup> et les images sismiques acquises au large<sup>29</sup> ou à terre<sup>30</sup> ont permis d'en préciser les étapes. Sa géométrie et son extension sont fonction des apports terrigènes du Rhône, qui repoussent le trait de côte et les environnements halomorphes vers le sud, et de la position du niveau marin relatif à l'aval. Les apports sédimentaires fluviaux dépendent des changements bioclimatiques globaux qui, à partir du Néolithique, se combinent avec les actions humaines dans le bassin versant.

En mouvement quasi perpétuel quand on les analyse à l'échelle de plusieurs siècles ou millénaires, les paysages du delta<sup>31</sup> ont conditionné favorablement les possibilités d'installation des sociétés agricoles depuis la Protohistoire.

Les recherches géoarchéologiques menées ces dernières années ont montré l'ancienneté de l'occupation du sol dans le delta du Rhône, qu'il faut faire remonter au VI<sup>e</sup> siècle av. J.-C. La principale raison de ce phénomène tient à la présence du Rhône, l'une des plus importantes voies commerciales de la Méditerranée vers l'Europe du Nord. Le recensement de nombreux gisements archéologiques<sup>32</sup> a permis de s'interroger sur la géographie, la nature et la fonction des sites découverts, ainsi que sur la vulnérabilité des sociétés antiques et médiévales face au fleuve, ses débordements, ses deltas de rupture de levée et ses défluviations. Plusieurs bras fossiles marquent encore fortement les lignes du paysage deltaïque actuel. Leur nombre et leur position ont fluctué au cours de l'histoire du delta; ils ont été des vecteurs de risques (crues, inondations, érosion), comme cela sera montré au cours de la période comprise entre l'Age du Fer et le Moyen Age<sup>33</sup>.

28 COLLECTIF CAMARGUE, *Etude hydrogéologique, pédologique et de salinité*; ALOÏSI et DUBOUL-RAZAVET, «Deux exemples de sédimentation deltaïque actuelle en Méditerranée»; Jean-Claude ALOÏSI *et al.*, «Evolution paléogéographique du plateau continental languedocien dans le cadre du Golfe du Lion. Analyse comparée des données sismiques, sédimentologiques et radiométriques concernant le Quaternaire récent», dans *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, 17, 2-1 (1975), p. 13-22; PONS *et al.*, «Edification de la Camargue et histoire holocène de sa végétation»; L'HOMER *et al.*, «Principales étapes de l'édification du delta du Rhône de 7000 BP à nos jours».

29 Michel TESSON *et al.*, «Late Quaternary deltaic lowstand wedges on the Rhône continental shelf, France», dans *Marine Geology*, 91 (1990), p. 325-332; Bernard GENSOUS, David WILLIAMSON, Michel TESSON, «Late Quaternary transgressive and highstand deposits of a deltaic shelf (Rhône delta, France)», dans Henry POSAMENTIER, Colin SUMMERHAYES, Bilal HAQ, Georges ALLEN (éd.), *Stratigraphy and Facies Associations in a Sequence Stratigraphic Framework*, Special Publication of the International Association of Sedimentologists, 18 (1993), p. 197-211; Tania MARSSET, Valérie BELLEC, «Late Pleistocene-Holocene deposits of the Rhône inner continental shelf (France): detailed mapping and correlation with previous continental and marine studies», dans *Sedimentology*, 49 (2002), p. 255-276.

30 Julie BOYER, Cédric DUVAIL, Paul LE STRAT, *Le delta du Rhône: géodynamique postglaciaire*, Rapport BRGM/RP-52179-FR, 2003.

31 Gilles ARNAUD-FASSETTA, Mireille PROVANSAL, «The lower valley and the delta of the Rhône River: Water landscapes of nature and history», dans Monique FORT, Marie-Françoise ANDRÉ (éd.), *Landscapes and Landforms of France*, Dordrecht, 2014, p. 207-218.

32 Corinne LANDURÉ, Michel PASQUALINI, Armelle GUILCHER (éd.), *Delta du Rhône. Camargue antique, médiévale et moderne*, Editions de l'Association Provence Archéologie, 2004 (Bulletin Archéologique de Provence, Supplément 2).

33 ARNAUD-FASSETTA, LANDURÉ, «Fluvial risk in rural areas from the Greek period to the early Middle Ages».

L'hydrographie et l'hydrologie du delta ont été fortement marquées par les actions humaines et ce, au moins depuis le XII<sup>e</sup> siècle. Les anciens bras du Rhône ont été maintenus en activité, sous forme de «lônes» ou de «bourdigues», bien après leur phase de pleine activité. La Camargue est restée sous la dépendance étroite de la mer jusqu'en 1856-1859, date d'achèvement de la construction de la Digue à la Mer qui supprima l'incursion des eaux marines en Basse Camargue<sup>34</sup>, et du Rhône jusqu'en 1869, date de l'endiguement complet du fleuve (commencé dès le Moyen Age), qui protégea la Camargue des inondations fluviales, mais la priva aussi des limons fertiles et de l'eau douce que le Rhône apportait autrefois<sup>35</sup>. Cela obligea les Camarguais à réaliser de lourdes opérations de drainage et d'irrigation, afin de pallier la salinisation des terres agricoles par les remontées de nappes salées. Vers 1875, le drainage des zones marécageuses vers l'étang de Vaccarès fut amélioré par l'aménagement des anciens bras du Rhône en grands collecteurs débouchant dans l'étang.

A partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'amélioration du drainage et la généralisation des stations de pompage favorisèrent la plantation de vignobles sur les terrains sableux ou limoneux lorsque ces derniers pouvaient être inondés en automne, après les vendanges<sup>36</sup>. L'apogée de la viticulture se place en 1933, avec 86 km<sup>2</sup> de vignes. Devenue aujourd'hui très marginale (quelques centaines d'hectares en ce début du XXI<sup>e</sup> siècle), elle apparaît comme un vestige agricole du siècle dernier. La riziculture devient la nouvelle activité en vogue dans le delta après la chute de la viticulture, amorcée dès les années 1940. Après un essor spectaculaire entre 1942 et 1960, la riziculture s'est maintenue comme l'une des spécialisations agricoles du delta; en 1996, elle ne couvrait pas moins de 130 km<sup>2</sup>. Enfin, nous ne pouvons terminer ce bref aperçu des activités liées à l'eau sans évoquer la saliculture et les activités dites traditionnelles (élevage extensif de chevaux et de taureaux, pêche, chasse, récolte du roseau). L'activité salicole est très ancienne et remonte bien au-delà du Moyen Age<sup>37</sup>. Développée au sud du delta, l'exploitation du sel a contribué à la structuration d'une véritable «société du sel» autour de Salin-de-Giraud et, dans une moindre mesure, à Aigues-Mortes. L'exploitation des marais salants est contrôlée depuis 1969 par la Compagnie des Salins du Midi, qui produit annuellement, à Salin-de-Giraud et Aigues-Mortes, au moins 1,5 Mt de sel. Les restructurations socio-économiques récentes en ont réduit la production à moins de 600 000 t/a.

<sup>34</sup> HEURTEAUX, «La Camargue et le Rhône, les usages de l'eau et du fleuve».

<sup>35</sup> Louis STOFFE, «La lutte contre les eaux dans les pays du Bas-Rhône au XII<sup>e</sup>-XV<sup>e</sup> s. L'exemple du pays d'Arles», dans *Méditerranée*, 3, 4 (1993), p. 57-68.

<sup>36</sup> HEURTEAUX, «La Camargue et le Rhône, les usages de l'eau et du fleuve».

<sup>37</sup> Jacques ROSSIAUD, *Réalités et imaginaire d'un fleuve. Recherches sur le Rhône médiéval*, Thèse de doctorat, Université Panthéon-Sorbonne (Paris 1), 1994 (non publié), volume 3.

## Méthodologie

Les protocoles méthodologiques ont été élaborés dans le but de 1) retracer les temps forts de la paléogéographie du delta par une approche hydrogéomorphologique et 2) préciser l'évolution de la diversité végétale par un suivi du signal pollinique enregistré dans de longues carottes sédimentaires.

### *Hydrogéomorphologie et reconstitution (paléo)géographique*

D'un point de vue hydrogéomorphologique, la méthodologie développée avait pour but de mener à bien deux actions: 1) délimiter la géométrie 3-D du delta à chaque étape cruciale de sa construction (passé, présent et futur proche) et 2) dresser une typologie des environnements sédimentaires, qui mette l'accent sur les conditions hydrodynamiques et salines des différents milieux concernés, pour que cela puisse être utile à la reconstitution des milieux végétaux.

#### *Délimitation de la géométrie 3-D du delta*

Cette délimitation s'est appuyée sur la corrélation stratigraphique de 33 carottages profonds<sup>38</sup>, dont nous avons harmonisé l'interprétation à la lumière de 11 nouveaux carottages dans la plaine deltaïque et des travaux des archéologues du DRASSM (Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines) sur les épaves au large de la Camargue<sup>39</sup> (fig. 2).

La reconstitution paléogéographique s'est appuyée sur les principes de la stratigraphie séquentielle<sup>40</sup>, grâce auxquels nous avons pu mettre en évidence et suivre l'évolution 3-D des trois prismes (rétrogradant, aggradant et progradant) constituant le delta. Ce modèle a également permis de hiérarchiser les différents facteurs responsables de la morphogenèse deltaïque et, en particulier, de la création/réduction de l'espace d'accommodation: la paléotopographie héritée du Pléistocène, l'eustatisme, le détritisme, la redistribution des apports par les houles marines et les actions humaines. Des sections ont été dressées longitudinalement et transversalement à l'axe de la vallée du Rhône afin de prendre en compte les variations

<sup>38</sup> LAGAAIJ, KOPSTEIN, «Typical features of a fluvio-marine offlap sequence»; COLLECTIF CAMARGUE, *Etude hydrogéologique, pédologique et de salinité*; OOMKENS, «Depositional sequences and sand distribution in the postglacial Rhône delta complex»; ALOÏSI et DUBOUL-RAZAVET, «Deux exemples de sédimentation deltaïque actuelle en Méditerranée»; PONS *et al.*, «Edification de la Camargue et histoire holocène de sa végétation».

<sup>39</sup> Luc LONG, Albert ILLOUZE, «Nouvelles épaves de Camargue. Les gisements antiques, modernes et contemporains», dans LANDURÉ, PASQUALINI, GUILCHER (éd.), *Delta du Rhône. Camargue antique, médiévale et moderne*, p. 291-330.

<sup>40</sup> Dominic EMERY, Keith MYERS, *Sequence Stratigraphy*, Oxford, 1996; Peter HOMEWOOD, Pierre MAURIAUD, François LAFONT, *Best practices in sequence stratigraphy for explorationists and reservoir engineers [Vade-mecum de Stratigraphie séquentielle pour géologues, géophysiciens et ingénieurs réservoir]*, Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production, Mémoire 25 (1999).

faciologiques dans les trois dimensions de l'espace-temps (fig. 3 à 5). Les données chronostratigraphiques ont été mises en relation avec la courbe eustatique établie autour du delta du Rhône sur substrat géologique réputé tectoniquement stable<sup>41</sup>. Pour chacune des cartes produites, la densité de drainage ( $D_d$ ; en km/km<sup>2</sup>) des bras principaux a été calculée à partir de l'équation de Horton<sup>42</sup>, qui fait le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique ( $L$ ; en km) et la surface deltaïque drainée ( $A_b$ ; en km<sup>2</sup>).

La typologie des milieux de sédimentation adoptée dans cette étude est la suivante: plaine deltaïque [chenal et delta de rupture de levée; plaine d'inondation proximale; bassin d'inondation (distinction «doux», «saumâtre» et «salé» en fonction des faunes)]; front deltaïque [proximal et peu profond (sables des cordons littoraux et des barres d'embouchure proximales; faunes marines, quelquefois saumâtres dans l'axe des embouchures); distal et profond (sables fins et limons des barres d'embouchure distales et du prodelta, faunes marines)]. La géométrie récente du delta a pu s'appuyer sur les cartes anciennes<sup>43</sup>.

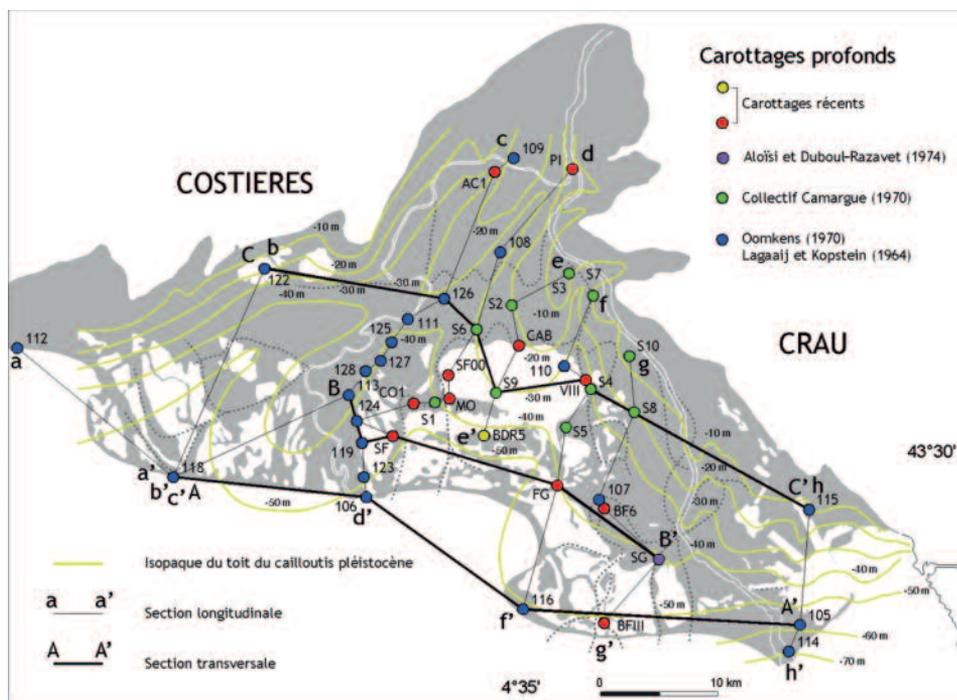


Fig. 2. Localisation des coupes et des carottages étudiés dans le delta du Rhône.

<sup>41</sup> ALOÏSI *et al.*, «Holocene transgression in the golfe du Lion (southwestern France)»; Jacques LABOREL *et al.*, «Biological evidence of sea-level rise during the last 4500 years on the rocky coasts of continental southwestern France and Corsica», dans *Marine Geology*, 120 (1994), p. 203-223.

<sup>42</sup> Robert HORTON, «Drainage basins characteristics», dans *Transactions – American Geophysical Union*, 13 (1932), p. 350-361.

<sup>43</sup> On a également eu recours aux travaux de F. Sabatier concernant l'évolution récente et future du trait de côte (François SABATIER, *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône*, Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille 3, 2001 (non publié)).



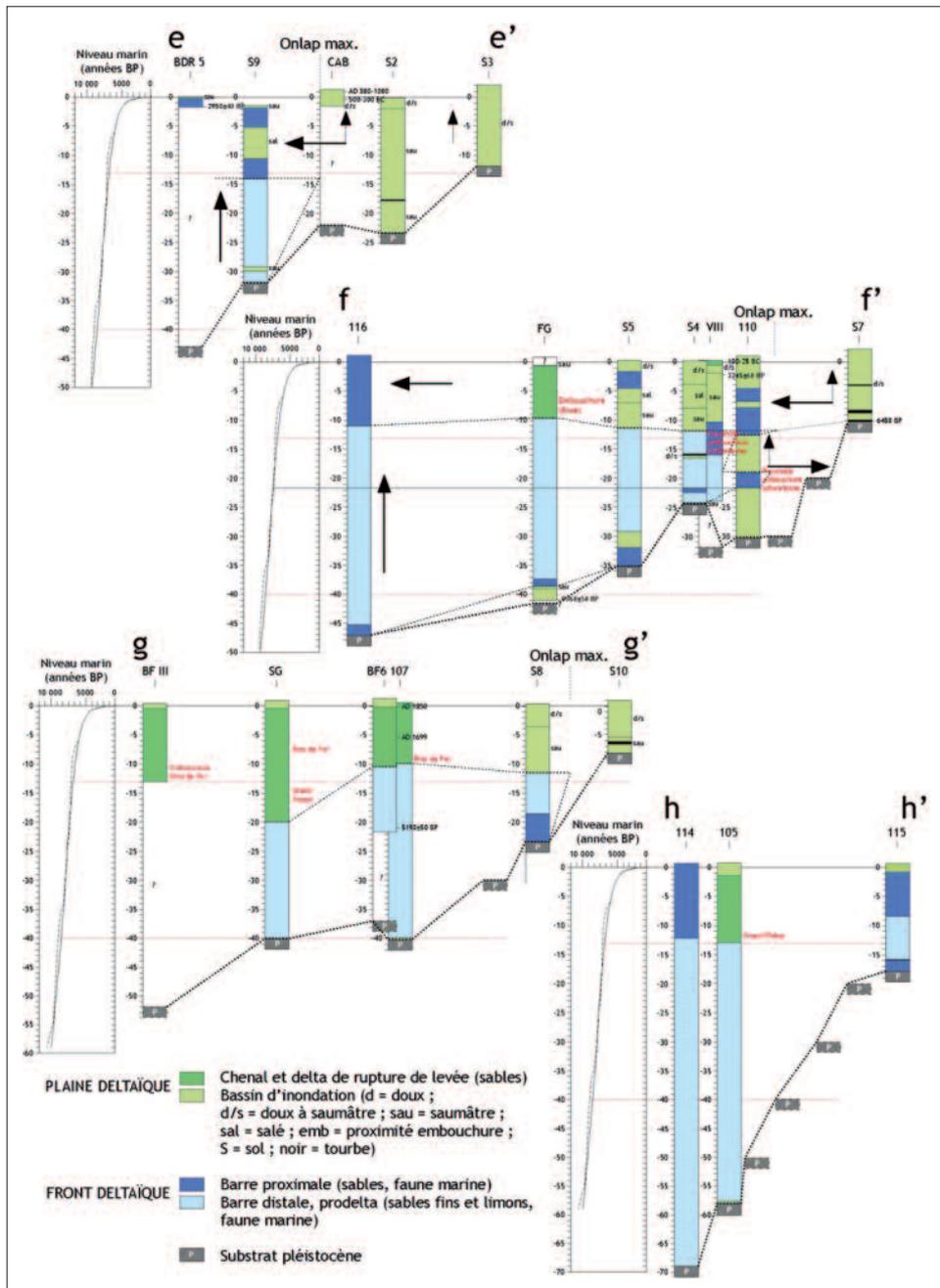


Fig. 4. Coupes longitudinales (deuxième partie) du delta du Rhône: chronostratigraphie, processus de mise en place du remblaiement holocène et relations avec les variations eustatiques. Echelle verticale en m NGF.

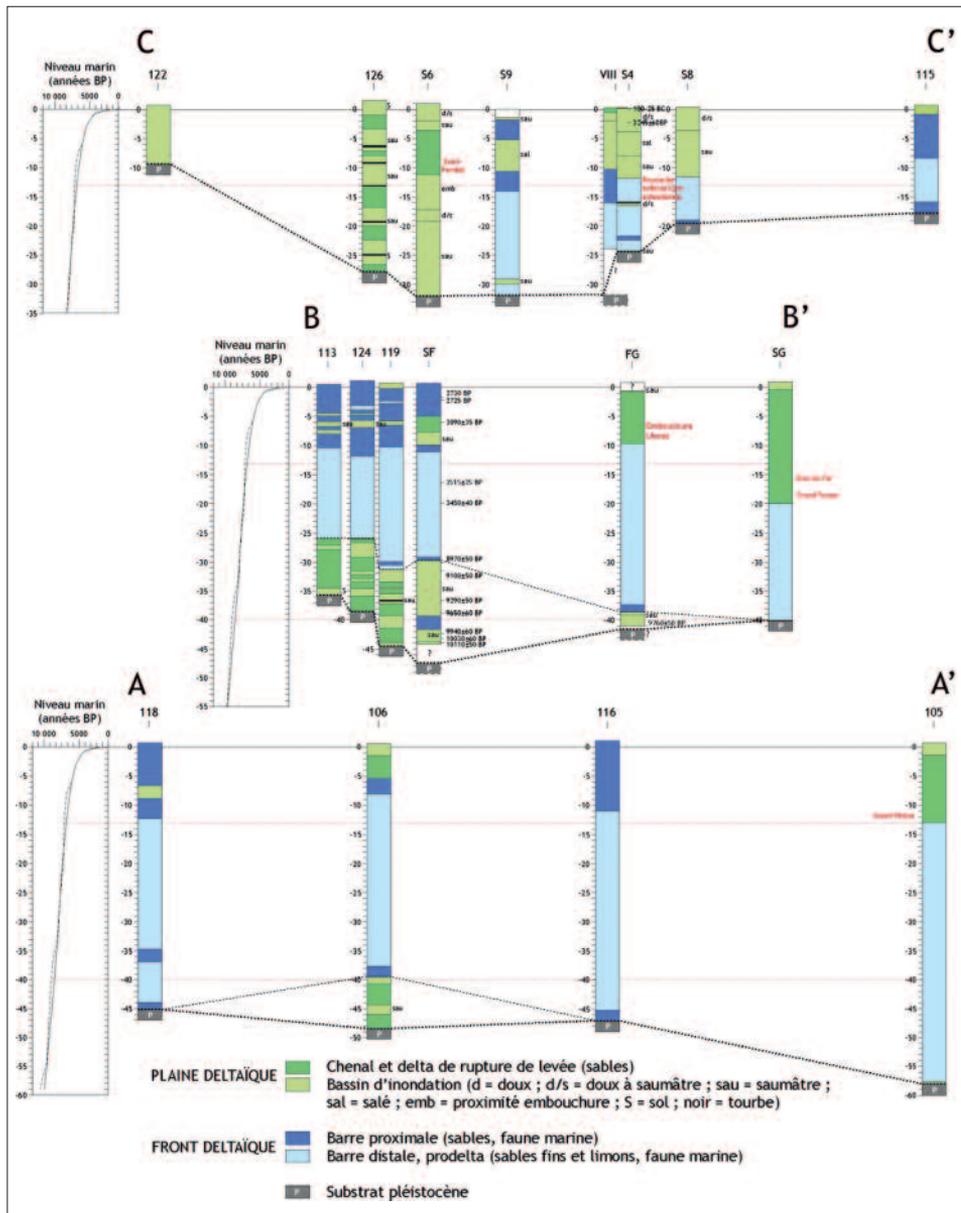


Fig. 5. Coupes transversales du delta du Rhône: chronostratigraphie, processus de mise en place du remblaiement holocène et relations avec les variations eustatiques. Echelle verticale en m NGF.

### *Délimitation des milieux doux, saumâtres et salés*

Il s'agit de l'action la plus délicate. En effet, si l'on connaît assez bien l'impact qu'ont pu avoir les variations du niveau marin sur le développement des différents prismes deltaïques, la relation entre la paléogéographie des traits de côte et celle du coin salé n'a jamais été abordée en Camargue. Nous l'avons envisagée ici, 1) en calant le modèle sur l'actuel, et 2) en bâtissant un modèle qui puisse être validé et utilisable rétrospectivement pour les périodes plus anciennes, pour lesquelles la position des anciens traits de côte était connue.

Pour ce faire ont été pris en compte plusieurs indicateurs: géomorphologiques, sédimentologiques et hydrologiques. Dans le delta du Rhône, en dehors de la zone littorale, il existe aujourd'hui deux types de circulation «salée», celle qui est présente au fond du Rhône (coin salé) et celle qui se trouve dans les nappes et les sols de plaine. Dans le fleuve, le maximum de la remontée du coin salé a été observé en 1990 lors d'un étiage sévère: jusqu'à Terrin (35,5 km en amont de l'embouchure) dans le Grand Rhône et jusqu'à Sylvéréal (11,5 km) dans le Petit Rhône. Concernant les nappes salées et saumâtres, les travaux de Ferrer<sup>44</sup> ont montré qu'aujourd'hui, celles-ci ne remontent guère au-delà d'une distance de 18 km à partir du trait de côte, et de 4 à 6 km autour du système Vaccarès. Cependant, l'hydrogéographie de ces nappes est complexe, car elle dépend de nombreux facteurs: géométrie et géographie du littoral, distance par rapport aux lagunes et aux étangs saumâtres (dont le Vaccarès), présence ou non des bras du Rhône, texture sédimentaire du sous-sol, artificialisation des circuits d'eau.

Malgré toutes ces contraintes, nous avons tenté de bâtir un modèle sur la relation paléo-géométrie deltaïque/paléo-trait de côte/paléo-coin salé/paléo-nappes salées-saumâtres-douces. Sur les cartes, nous avons donc délimité le passage doux/saumâtre-salé en essayant de tenir compte d'un maximum de facteurs. Par exemple, nous avons non seulement appliqué la «règle» observée aujourd'hui, qui veut que les milieux doux soient situés la plupart du temps au mieux entre 4 à 6 km d'un «point» salé (mer, étang), mais aussi considéré une altitude de quelques mètres quand la bordure immédiate du delta était très pentue, comme ce fut notamment le cas au début de l'Holocène. En effet, en amont ainsi que sur les marges (versants), la limite «doux/saumâtre-salé» est contrainte par les apports détritiques qui contribuent à l'élévation de la topographie: au-delà de +3 m au-dessus du niveau marin, il n'y a plus beaucoup de chances de trouver une nappe salée ou saumâtre en surface, même si celle-là peut bel et bien être présente en profondeur<sup>45</sup>.

Même s'il faut considérer avec la prudence qui s'impose l'utilisation du modèle actuel (gestion artificielle des circuits d'eaux salée et douce, Digue à la Mer, digues du Rhône...), les résultats que nous avons obtenus sont apparus comme étant, la

<sup>44</sup> A. FERRER, *Activités humaines et gestion de l'eau. Conséquences d'une zone humide: la Camargue*, Mémoire de DESS «Espaces et Milieux», Université Paris-Diderot (Paris 7), 1996 (non publié).

<sup>45</sup> COLLECTIF CAMARGUE, *Etude hydrogéologique, pédologique et de salinité*.

plupart du temps, très proches de ceux qui ont été publiés par Pons *et al.*<sup>46</sup> et cohérents par rapport aux données stratigraphiques et paléo-écologiques dont nous disposons. Les calculs de surface ont été effectués par un logiciel SIG; toutes les valeurs proposées sont entachées d'une marge d'erreur que nous estimons à  $\pm 5\%$ .

### *Palynologie et diversité végétale*

Concernant la diversité végétale, la méthode a principalement consisté à utiliser l'analyse pollinique pour rendre compte de l'évolution des espèces végétales au cours du passé récent, que ce soit sous l'effet du climat seul ou de l'effet conjugué du climat et de l'homme<sup>47</sup> (fig. 6 et 7).

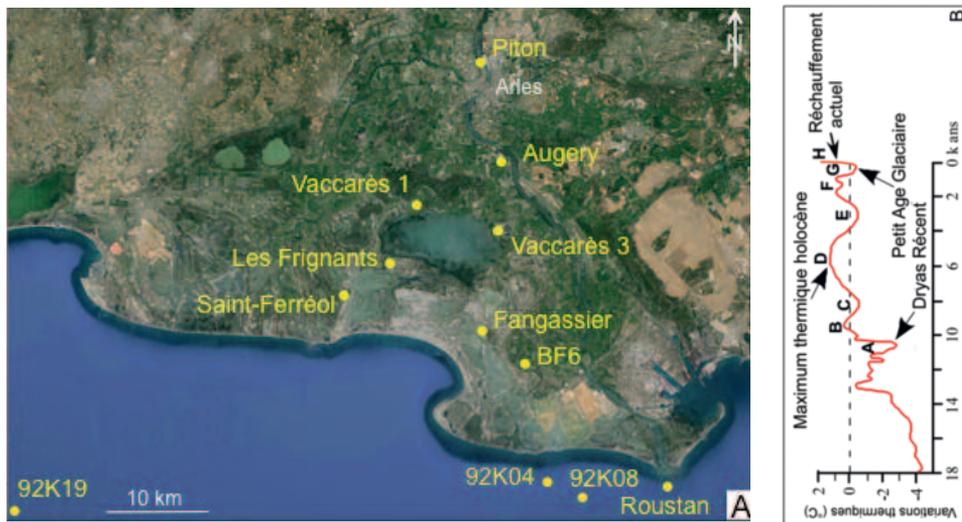


Fig. 6. Données polliniques analysées dans le cadre de l'étude. A: localisation des carottes. B: grandes phases climatiques des onze derniers millénaires enregistrées en Camargue (A à H)<sup>48</sup>.

<sup>46</sup> PONS *et al.*, «Edification de la Camargue et histoire holocène de sa végétation».

<sup>47</sup> Hélène TRIAT-LAVAL, *Contribution pollenanalytique à l'histoire Tardi et Postglaciaire de la végétation de la basse vallée du Rhône*, Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille 3, 1979 (non publié); SUC *et al.*, *Un atelier exceptionnel d'étude de la dynamique de la diversité végétale*.

<sup>48</sup> D'après TRIAT-LAVAL, *Contribution pollenanalytique à l'histoire Tardi et Postglaciaire de la végétation de la basse vallée du Rhône* et SUC *et al.*, *Un atelier exceptionnel d'étude de la dynamique de la diversité végétale*. La courbe de variation de la température globale au cours des derniers 18 000 ans est de Martin SIEGERT, *Ice Sheets and Late Quaternary Environmental Change*, Chichester, 2001, calibrée en années BP.

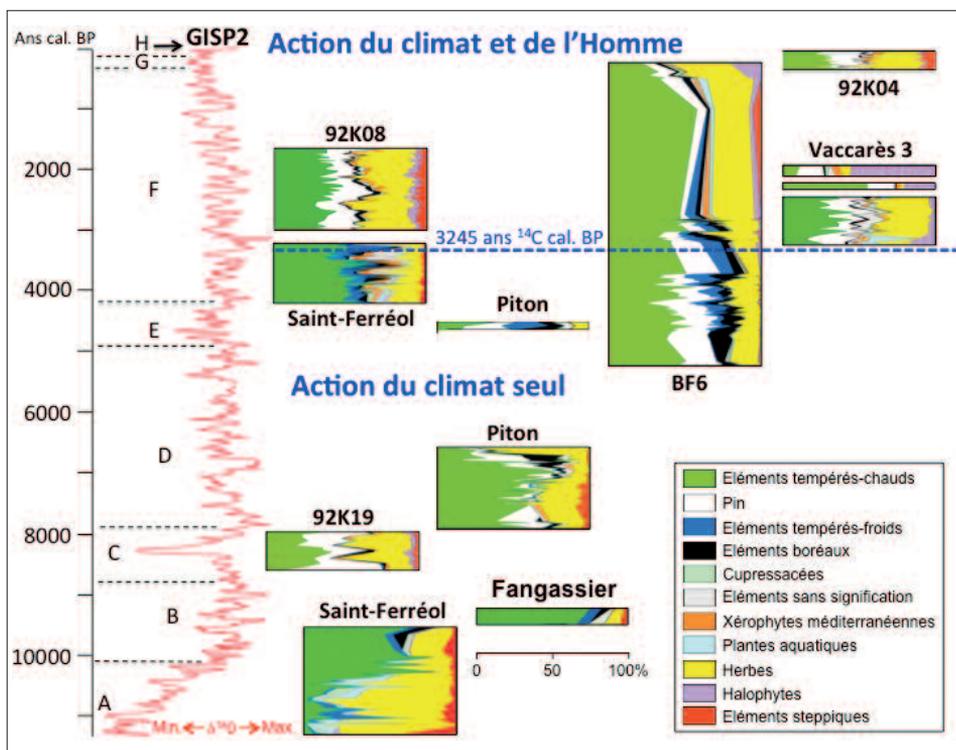


Fig. 7. Diagrammes polliniques<sup>49</sup> synthétiques des carottes récemment étudiées<sup>50</sup>, corrélées avec la courbe isotopique de l'oxygène GISP2 de Grootes et Stuiver<sup>51</sup>, elle-même calibrée en années cal. BP, sur laquelle les grandes phases climatiques (A à H) ont été situées. La localisation des carottages se trouve sur la fig. 6A.

<sup>49</sup> Les analyses polliniques sont de: Nabila ACHERKI, *Analyse palynologique de quatre carottes du Golfe du Lion. Application à la restitution de la végétation et du climat du midi de la France pendant le Dernier Cycle Climatique et à la stratigraphie marine*, Thèse de doctorat, Université Sciences et Techniques (Montpellier 2), 1997, pour les sites 92K19, 92K08 et 92K04; Célia BEAUDOUIN, *Effets du Dernier Cycle Climatique sur la végétation de la basse vallée du Rhône et sur la sédimentation de la plate-forme du Golfe du Lion d'après la palynologie*, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard (Lyon 1), 2003 (non publié), pour le sondage Piton; Damiano TINACCI, *La registrazione pollinica in un sistema prodeltaico come strumento per la ricostruzione paleoambientale della basse valle del Rodano durante l'Olocene*, Thèse de doctorat, Università degli Studi di Firenze, 2005 (non publié), pour la carotte BF6; Jérôme CUNET, *Végétation, climat, incendies dans le Bas-Rhône depuis 12 000 ans. Etude palynologique de la carotte SF (Cacharel)*, Mémoire de master 2, Université Claude Bernard (Lyon 1), 2007 (non publié), et J.-P. Suc (inédit) pour la carotte Saint-Ferréol; J.-P. Suc et L. Thévenod (inédit) pour la carotte Fangassier; J.-P. Suc et J.-L. de Beaulieu (dans ARNAUD-FASSETTA *et al.*, «Evidence for an early landuse in the Rhône Delta») pour la carotte Vaccarès 3; C. Beaudouin, J.-P. Suc et J. Ferrier (dans BEAUDOUIN *et al.*, «Present-day rhythmic deposition in the Grand Rhône prodelta») pour les carottes sur le site de la bouée de Roustan (KTR05, TRS01bis).

<sup>50</sup> SUC *et al.*, *Un atelier exceptionnel d'étude de la dynamique de la diversité végétale*.

<sup>51</sup> Pieter GROOTES, Minze STUIVER, «Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10<sup>-3</sup>-10<sup>-5</sup>-year time resolution» dans *Journal of Geophysical Research*, 102 (1997).

Les travaux menés par les palynologues ont conduit à calibrer le message pollinique par rapport à la flore actuelle: cela a été fait par l'étude comparée de 23 relevés floristiques et du contenu pollinique de mousses ou de sédiments de surface pris dans les mêmes localités. La flore pollinique obtenue compte 94 taxons (espèces, genres ou familles en fonction du niveau d'identification permis par la palynologie), dont 63 habitent la Camargue (31 taxons correspondent à des pollens d'apport plus ou moins lointain) contre 224 taxons inventoriés sur les abords immédiats du prélèvement pollinique. Cela représente une perte d'information de l'ordre de 70%, compte tenu de l'imprécision taxonomique en palynologie – les pollens d'arbres sont le plus souvent identifiés au niveau du genre seulement, ceux des herbes au niveau de la famille.

Les assemblages polliniques sont bien représentatifs des environnements. Lorsque le fleuve est le vecteur principal en grains de pollen<sup>52</sup>, la perte en information est moins sévère (183 taxons recensés dans les sédiments prodeltaïques actuels du Grand Rhône (150 d'entre eux pouvant vivre en Camargue), site Roustan (fig. 6))<sup>53</sup>. Cette comparaison, qui a fait l'objet d'une approche statistique corrélée à l'état actuel, valide donc l'utilisation des sédiments prodeltaïques holocènes pour les reconstitutions floristiques passées.

La figure 7 montre la précision des corrélations climatostratigraphiques qui peuvent être proposées entre chacune des successions polliniques étudiées et une courbe isotopique de l'oxygène de référence, en l'occurrence la courbe GISP2 établie sur une carotte de glace du Groenland<sup>54</sup>. Ces corrélations sont calées de prime abord par des âges <sup>14</sup>C, puis fondées sur les maxima de végétation arborée reliés aux pics isotopiques «chauds» (maxima d'<sup>18</sup>O), d'une part, et sur les maxima de végétation herbacée reliés aux pics isotopiques «froids» (minima d'<sup>18</sup>O), d'autre part.

## Résultats

L'histoire hydro-bio-géomorphologique du delta du Rhône qui va suivre repose sur un découpage qui tient compte à la fois des processus morphodynamiques et des éléments chronologiques à notre disposition, qui sont fondés sur les principes de la corrélation stratigraphique, sur de nombreuses datations radiocarbone et sur les trouvailles archéologiques.

Ainsi ont pu être décrits et analysés huit temps forts de l'évolution paléogéographique, regroupés en trois phases distinctes:

- Phase 1 (rétrogradation-aggradation): remontée rapide du niveau marin (accroissement important de l'espace d'accommodation, houles efficaces), apports détritiques abondants (9800 BP, 7600 BP);

<sup>52</sup> Geneviève CAMBON *et al.*, «Modern pollen deposition in the Rhône delta area (lagoonal and marine sediments), France», dans *Grana*, 36 (1997), p. 105-113, ont montré que dans l'embouchure du Grand Rhône, 400 grains étaient actuellement apportés par le fleuve contre 1 par le vent.

<sup>53</sup> Célia BEAUDOUIN *et al.*, «Present-day rhythmic deposition in the Grand Rhône prodelta (NW Mediterranean) according to high-resolution pollen analyses», dans *Journal of Coastal Research*, 21 (2005), p. 292-306.

<sup>54</sup> GROOTES, STUIVER, «Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10<sup>-3</sup>-10<sup>-5</sup>-year time resolution», C12, 26455-26470.

- Phase 2 (progradation-aggradation): décélération lente (6500-5000 BP) puis rapide (4500-3000 BP, 2150-1750 BP) de la vitesse de remontée du niveau marin, avant sa stabilisation relative (1200-1000 BP), dans un contexte d'apports sédimentaires variables;
- Phase 3 (progradation contrariée): remontée lente du niveau marin dans un contexte de réduction des apports sédimentaires (aujourd'hui et demain).

Une mise en perspective avec les résultats palynologiques est proposée pour chacune de ces phases.

### ***Phase 1 (9800-7600 BP; 9400-6200 av. J.-C.): rétrogradation-aggradation***

*Vers 9800 BP (9400-9200 av. J.-C.)*

Le niveau marin se situe autour de -40 m NGF<sup>55</sup>. La remontée du plan d'eau marin est rapide, car les grandes calottes glaciaires et les glaciers de montagne sont en cours de récession. Situé en aval des nombreuses langues de glace alpines, le Rhône devait avoir un débit, une compétence et une capacité de transport sans commune mesure avec les valeurs actuelles<sup>56</sup>. Cela a dû avoir également une incidence sur le bilan entre les entrées d'eau douce et les entrées d'eau salée, dans l'aire deltaïque et à proximité de celle-ci. En fait, on émet l'hypothèse que le coin salé est alors important et invasif (transgression marine), mais sa dilution est rendue possible par d'abondantes entrées d'eau douce dans le delta (de petite taille). Le résultat est que les milieux deltaïques saumâtres sont à ce moment-là fort bien développés (fig. 3 et 5).

La remontée rapide de la Méditerranée délivre un espace d'accommodation important, rapidement remblayé par d'abondants apports sédimentaires. Combinés au fait que la surface d'ennoiement est réduite, ces deux facteurs produisent un rythme d'aggradation phénoménal<sup>57</sup>. Cette phase est aussi et surtout une phase de rétrogradation, au cours de laquelle le prisme deltaïque se déplace vers l'amont, s'emboîtant dans les séquences rétrogradantes précédemment déposées ou s'appuyant sur la surface de ravinement polygénique glaciaire/postglaciaire qui affecte le toit du cailloutis pléistocène. La remontée rapide du plan d'eau marin exacerbe l'érosion des prismes rétrogradants, de sorte que ceux-ci ne sont conservés que dans l'axe et à proximité des embouchures du Rhône, là où les séquences sont les plus épaisses et là où le toit du substrat géologique est en pente faible (fig. 5, section A-A', et fig. 8). Le prisme deltaïque, qui représente seulement 629 km<sup>2</sup> (soit 36,1% de l'actuel delta; tab. 1), est formé par la coalescence de plusieurs deltas alimentés par

<sup>55</sup> ALOÏSI *et al.*, «Holocene transgression in the golfe du Lion (southwestern France)».

<sup>56</sup> Jean-Paul BRAVARD *et al.*, «Paléodynamique du site fluvial de Lyon depuis le Tardiglaciaire», dans Jean-Paul BRAVARD, Michel PRESTREAU (éd.), *Dynamique du paysage – Entretiens de géoarchéologie*, Lyon, 1997, p. 177-201.

<sup>57</sup> À rapprocher du «phénomène d'hypersédimentation» décrit dans les travaux du COLLECTIF CAMARGUE, *Etude hydrogéologique, pédologique et de salinité* et de PONS *et al.*, «Édification de la Camargue et histoire holocène de sa végétation».

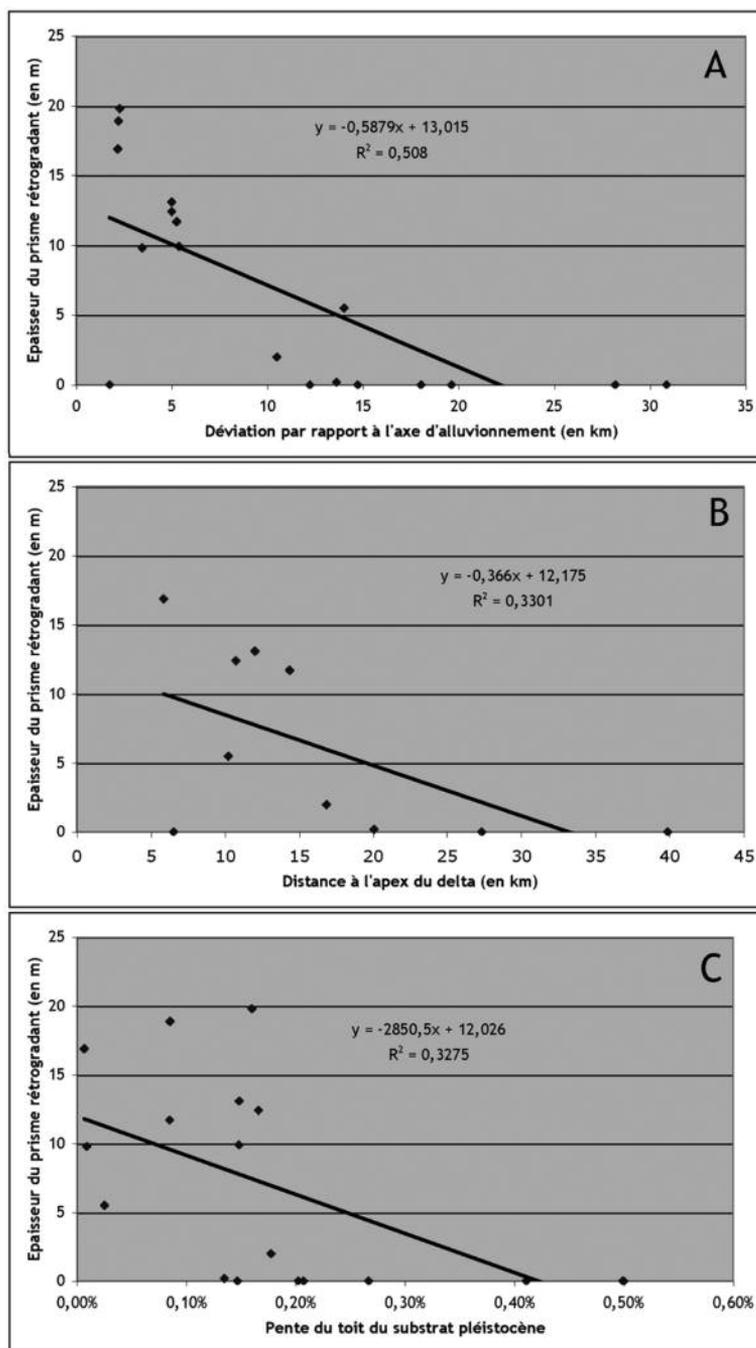


Fig. 8. Relations significatives entre l'épaisseur du prisme rétrogradant holocène du delta du Rhône et (A) la déviation par rapport à l'axe de l'alluvionnement, (B) la distance à l'apex du delta et (C) la valeur de la pente du toit du cailloutis pléistocène. Les valeurs sont dérivées de l'analyse des carottages.

le Rhône ou de petits fleuves côtiers (fig. 9A). Le prisme deltaïque du Rhône (deux branches distinctes) est constitué *stricto sensu* de deux deltas dont les apex sont séparés par un interfluve (croupe d'une dizaine de mètres de hauteur, s'étirant selon une direction NE-SO). Dans la partie amont du delta, les deux branches principales du Rhône ( $D_d = 0,17 \text{ km/km}^2$ ) sont encore bien encaissées dans leur vallée; au débouché desdites branches se mettent en place de puissantes accumulations que les houles marines et la dérive littorale redistribuent sous forme de flèches sableuses. Ces accumulations, qui viennent barrer partiellement les exutoires, sont non seulement le signe d'une charge sédimentaire abondante, mais aussi et surtout elles signent l'influence déterminante qu'ont les houles et les courants marins sur le façonnement du front deltaïque à cette époque<sup>58</sup>.

En fait, l'essentiel (82,2%) du delta est constitué de milieux saumâtres à salés. On estime que les 65% de la surface actuelle du delta du Rhône sont alors occupés par des milieux strictement continentaux où l'eau douce prédomine (tab. 1). En aval, l'eau salée pénètre dans le cailloutis pléistocène, mais à une profondeur suffisante pour permettre à l'eau douce de circuler au-dessus, à proximité immédiate de la zone deltaïque<sup>59</sup>. Au total, la transition des milieux doux aux milieux saumâtres/salés devait donc être brutale.

Pour finir, une paléotopographie différenciée<sup>60</sup>, directement héritée de la morphogenèse pléistocène, a certainement prévalu entre -40 m et -20 m NGF, peut-être même jusqu'à l'«onlap»<sup>61</sup> maximum (cf. *infra*), constituant de possibles zones refuges pour la végétation. Au-delà cependant, les contrastes topographiques vont être considérablement atténués par l'alluvionnement rhodanien (fig. 3 à 5), de sorte qu'ils n'auront plus d'incidence sur la position des paléochenaux fluviaux. L'hydrographie rhodanienne va alors dépendre du rythme de défluviation<sup>62</sup>, lui-même en relation avec la vitesse d'aggradation de la plaine alluviale et la dynamique fluviale opérant selon le mode de l'autocyclicité<sup>63</sup>.

Cette évolution hydrogéomorphologique s'inscrit dans deux phases climatiques distinctes, bien documentées par le bras de Saint-Ferréol (fig. 6 et 7)<sup>64</sup>:

- La phase climatique A (moins de 60 taxons dont les 90% pouvaient habiter le delta) se caractérise par la prédominance des éléments herbacés (Asteraceae dont *Artemisia* et Poaceae surtout; 30 taxons, les plantes aquatiques exceptées), la grande faiblesse des halophytes par rapport aux plantes affectionnant les milieux d'eau douce (exprimant un certain développement des milieux deltaïques doux

<sup>58</sup> William GALLOWAY, David HOBDA, *Terrigenous clastic depositional systems. Applications to fossil fuel and groundwater resources*, Berlin, New York, 1996.

<sup>59</sup> Cette étroite frange d'eau douce circulant sur le biseau salé profond a été bien décrite sur la coupe 1.1 de PONS *et al.*, «Edification de la Camargue et histoire holocène de sa végétation».

<sup>60</sup> Un «delta loin d'être plat» décrit dans le COLLECTIF CAMARGUE, *Etude hydrogéologique, pédologique et de salinité*.

<sup>61</sup> Biseau d'aggradation.

<sup>62</sup> Gilles ARNAUD-FASSETTA, «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», dans *Geografiska Annaler A – Physical Geography*, 86, 4 (2004), p. 367-383.

<sup>63</sup> L'autocyclicité fait référence aux processus inhérents au fonctionnement même du système géomorphologique deltaïque (exemple: exhaussement de la plaine par défluviations successives), par opposition à l'allocyclicité, régie par les facteurs globaux (exemple: l'influence des fluctuations glacio-eustatiques du niveau marin sur la construction deltaïque).

<sup>64</sup> SUC *et al.*, *Un atelier exceptionnel d'étude de la dynamique de la diversité végétale*.

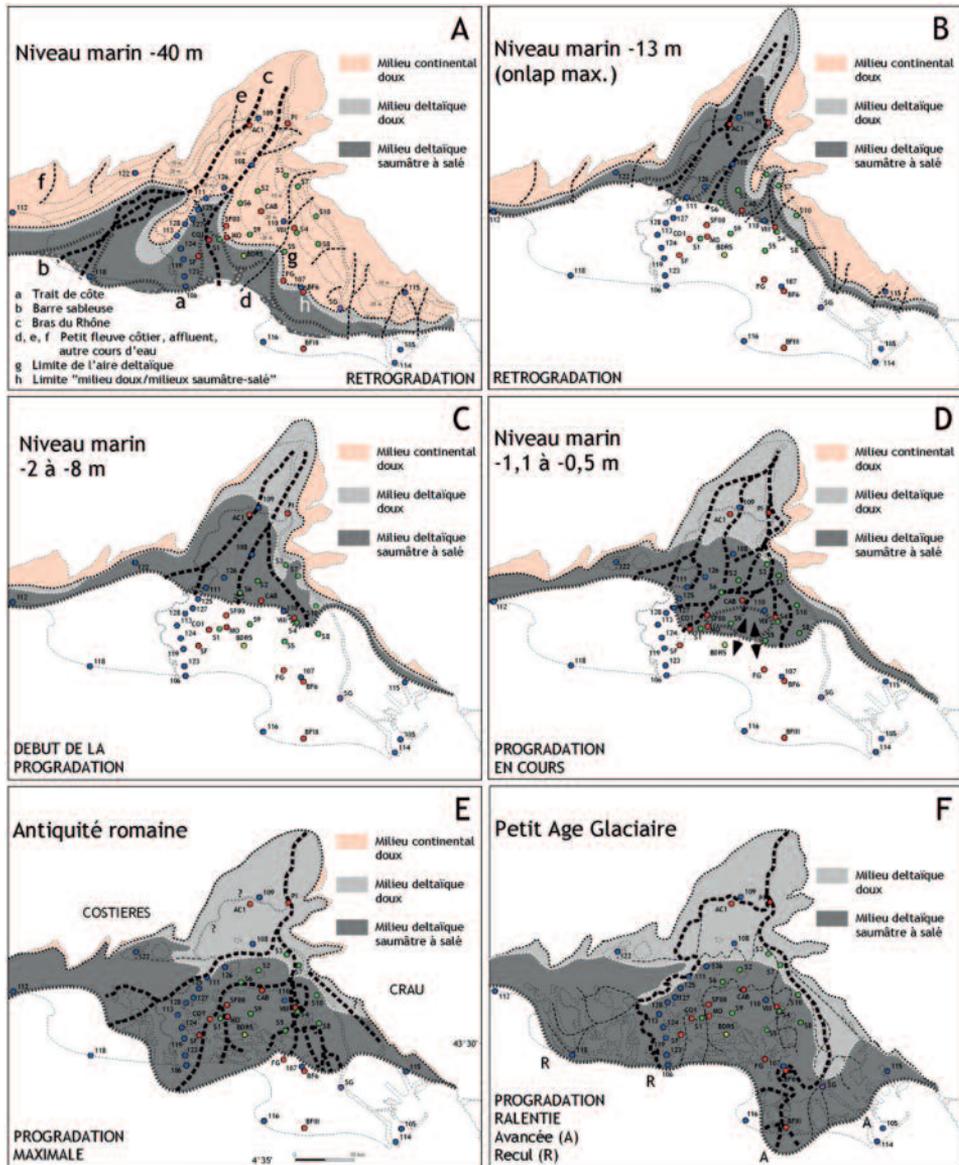


Fig. 9. Cartographie du delta du Rhône et de sa bordure continentale à différents stades de leur développement (première partie). A: vers 9800 BP (9400-9200 av. J.-C.); B: vers 7600 BP (6600-6200 av. J.-C.); C: vers 6500-5000 BP (5700-3600 av. J.-C.); D: vers 4500-3000 BP (3500-1100 av. J.-C.); E: vers 2150-1750 BP (200 av. J.-C.-200 apr. J.-C.); F: au début du XVIII<sup>e</sup> siècle.

- et la quasi-absence de milieux deltaïques saumâtres à salés, à la différence de ce qui est estimé pour ce secteur dans la figure 9A, peut-être en raison de l'influence locale du fleuve), un certain développement de la ripisylve (en accord avec l'environnement décrit dans la figure 9A). Les arbres tempérés sont surtout représentés par *Pinus*, les Cupressaceae et *Betula* (relayé par *Corylus* dans la partie supérieure de la phase), *Quercus* étant rare, tout comme les xérophytes méditerranéennes.
- La phase climatique B (70 taxons, dont près des 80% pouvaient habiter le delta), également enregistrée à Fangassier (dont l'étude est seulement commencée), se marque par la diversification des arbres tempérés-chauds (*Quercus*, *Corylus* et *Tilia* surtout). Les pollens de la ripisylve (avec ses cinq éléments: *Alnus*, *Fraxinus*, *Populus*, *Salix* et *Ulmus*) sont nombreux, d'autant plus que la densité de drainage est assez élevée. Les herbacées restent bien représentées, ainsi que les plantes aquatiques (eau douce), qui abondent, tandis que, comme précédemment, les halophytes restent rares. Les pollens des xérophytes méditerranéennes (6 taxons) sont plus fréquents.

Vers 7600 BP (6600-6200 av. J.-C.)

Le niveau marin est remonté très rapidement jusqu'à la cote de -13 m NGF (fig. 3 à 5). Les cordons littoraux fossiles identifiés au nord de l'actuelle limite septentrionale du Vaccarès signent l'«onlap» maximum holocène (fig. 3). Le delta du Rhône est devenu une seule et même unité, mais une bonne partie de l'aire deltaïque continue de se construire grâce aux apports adjacents des petits fleuves côtiers (fig. 9B). Moins nombreux qu'auparavant, ces derniers participent *de facto* moins activement au bilan sédimentaire de la plaine deltaïque, d'autant plus que leur force tractrice s'est amoindrie, par réduction de la pente hydraulique, et que la dynamique marine remanie sans cesse leurs alluvions qui parviennent au rivage. Au total, l'aire deltaïque subit une érosion sévère sur ses deux marges: sa surface passe à 539 km<sup>2</sup> (31% de la surface actuelle), soit une réduction de 14,3% (-0,028 à -0,035 km<sup>2</sup>/a) par rapport à la période précédente.

Dans le même temps, l'emprise des milieux continentaux (353 km<sup>2</sup>) se réduit considérablement (-68,9%). Les milieux deltaïques doux sont en légère augmentation, représentant près de 30% de la surface totale. Les deux embouchures rhodaniennes («Rhône oriental» et «Rhône occidental») semblent s'être rapprochées; elles se concentrent toujours dans la partie axiale de la ria ( $D_d = 0,24 \text{ km/km}^2$ ), où elles subissent l'effet de puissants courants fluviaux et marins, dont témoignent les faunes identifiées dans les sédiments des paléochenaux (carottes S1, VIII et 110, fig. 3 et 4). Le delta est alors dans un stade estuarien terminal et la faible pente du thalweg de la ria favorise la remontée de l'aire deltaïque à l'intérieur du continent, à une latitude très certainement proche de celle où se trouvent aujourd'hui les villes de Tarascon et de Beaucaire.

Durant toute cette première partie de la construction deltaïque, les bouches du Rhône s'installent dans la ria<sup>65</sup>, à l'image de celle qui a été mise en évidence à la base

<sup>65</sup> Vallée fluviale ennoyée par la mer.

de la carotte PI (Arles-Trinquetaille), qui évoque la partie amont d'une embouchure<sup>66</sup>. Le mode de fonctionnement des embouchures deltaïques est contrôlé en amont par les apports fluviaux et vers l'aval par les puissants courants marins et la houle. Des hauts-fonds subsistent et des «bancs sédimentaires» encombrant les exutoires, du fait de la dominance de la dynamique marine sur la dynamique fluviale. Cette étape sera suivie d'une phase de progradation qui précède l'entame de la décélération de la vitesse de remontée du niveau marin.

Cette hydromorphodynamique s'inscrit dans la phase climatique C (fig. 6 et 7)<sup>67</sup>. Encore peu documentée, si ce n'est par la carotte en mer 92K19, elle est marquée par le recul des essences arborées thermophiles (*Quercus* à feuillage caduc surtout).

### ***Phase 2 (6500-200 BP; 5700 av. J.-C.-XVIII<sup>e</sup> siècle): progradation-aggradation***

*Vers 6500-5000 BP (5700-3600 av. J.-C.)*

C'est vers 6500-5000 BP (5700-3600 av. J.-C.) que s'affirme l'édification du prisme de haut niveau globalement progradant vers le sud (fig. 9C). La progradation n'est pas très rapide, car le niveau marin, qui se situe alors entre -8 m et -2 m NGF, remonte encore rapidement (fig. 3 à 5). Puis, les effets de la décélération lente de la remontée de la Méditerranée sont compensés par d'abondants apports sédimentaires provenant essentiellement de l'alluvionnement rhodanien. Dès lors, la limite entre milieux doux et milieux saumâtres ne dépassera plus guère la latitude de l'actuelle diffluence Grand Rhône-Petit Rhône. A la latitude de l'actuelle cité d'Arles, on sait qu'après cette date, le coin salé est définitivement repoussé vers le sud<sup>68</sup>.

La plaine deltaïque (598 km<sup>2</sup>) occupe 34,3% de la surface actuelle (tab. 1). Elle est alimentée par plusieurs bras fluviaux («Rhône de Peccaïs I» à l'ouest, «Rhône de Saint-Ferréol I» au centre, «Rhône d'Ulmet I» à l'est;  $D_d = 0,15$  km/km<sup>2</sup>), dont les alluvions accumulées aux embouchures contribuent à accroître l'aire deltaïque de 10,9% par rapport à la période précédente. La géométrie du front deltaïque semble accréditer la thèse selon laquelle la branche orientale serait la plus active (fig. 9C). Les milieux deltaïques doux (200 km<sup>2</sup>) sont en extension, occupant plus du tiers de l'aire deltaïque du moment, mais les milieux saumâtres à salés (398 km<sup>2</sup>) restent prédominants (66,6%), alors que les milieux continentaux (173 km<sup>2</sup>) sont en nette régression (-51%).

Cette évolution paléogéographique et paléohydrographique s'inscrit dans la phase climatique D (fig. 6 et 7)<sup>69</sup>, du reste bien reconnue en amont (Piton), au

<sup>66</sup> Gilles ARNAUD-FASSETTA *et al.*, «A -8000-yr record of palaeohydrology and environmental change in fluvial-influenced sediments from the urban Arles-Piton core, upper Rhône Delta, France», dans *Zeitschrift für Geomorphologie*, 49, 4 (2005), p. 455-484.

<sup>67</sup> SUC *et al.*, *Un atelier exceptionnel d'étude de la dynamique de la diversité végétale*.

<sup>68</sup> ARNAUD-FASSETTA *et al.*, «A -8000-yr record of palaeohydrology and environmental change».

<sup>69</sup> SUC *et al.*, *Un atelier exceptionnel d'étude de la dynamique de la diversité végétale*.

centre (Augery)<sup>70</sup> et en aval du delta (Les Frignants, carotte BF6)<sup>71</sup>. La diversité floristique augmente (plus de 85 taxons, dont les 80% pouvaient habiter le delta). Les pollens d'arbres tempérés-chauds abondent (*Corylus*, *Quercus* principalement), certains pouvant s'être installés dans le delta ou à sa proximité immédiate (importance de *Tilia* dont le pollen se transporte peu). La ripisylve est bien exprimée par les milieux aquatiques d'eau douce, malgré la diminution de la densité de drainage. Les halophytes sont bien perçues seulement à Augery (au milieu du delta). On enregistre déjà quelques indices de cultures (céréales, lin, vigne).

*Vers 4500-3000 BP (3500-1100 av. J.-C.)*

L'aire deltaïque (766 km<sup>2</sup>) s'est accrue de 28,1% (0,037-0,336 km<sup>2</sup>/a) par rapport à la période précédente, occupant alors 44% de la surface deltaïque actuelle. Deux facteurs sont tenus responsables de cette progradation rapide: 1) la décélération lente de la vitesse de remontée du niveau marin (fig. 3 à 5), qui limite la création de l'espace d'accommodation, et 2) des apports importants en sédiments accumulés sur la plaine et le front deltaïques par plusieurs branches fluviales hiérarchisées ( $D_d = 0,23$  km/km<sup>2</sup>), dont les plus actives semblent se situer dans la partie centrale («Rhône de Saint-Ferréol II») et orientale («Rhône d'Ulmet II»), la branche occidentale («Rhône de Peccaïs II») apparaissant quant à elle plus moribonde.

La progradation rapide des environnements fluvio-lagunaires, d'une part, et la redistribution des alluvions aux embouchures par les houles marines, d'autre part, favorisent le développement de cordons littoraux en avant de bassins d'inondation plus ou moins en connexion avec la mer ouverte. L'un de ces bassins, situé entre les lobes de Saint-Ferréol II et d'Ulmet II, correspond à l'assise de celui qu'occupera plus tard l'actuel étang de Vaccarès. Au total, les milieux deltaïques doux (273 km<sup>2</sup>) continuent de progresser: ils occupent à présent 35,6% de l'aire deltaïque, au détriment des milieux continentaux (110 km<sup>2</sup>) qui n'occupent plus que 6,3% de l'aire deltaïque actuelle. Les milieux saumâtres à salés (493 km<sup>2</sup>) prédominent à 64,4% (tab. 1). Cependant, plus de la moitié de la surface actuelle du delta est encore sous la mer...

Enfin, les données chronostratigraphiques ont permis de suivre l'évolution de deux systèmes: la plaine deltaïque (carottes VIII et SF00) et le front deltaïque [barre proximale (carotte MO); barre distale et prodelta (carotte SF)]. On en déduit la cinématique suivante, à partir du trait de côte 6500-5000 BP (5700-3600 av. J.-C.) défini précédemment:

- Vers 4400 BP: progression du Rhône de Saint-Ferréol vers le S-SO (carotte SF10)<sup>72</sup>;
- Vers 4000 BP: progradation et construction du cordon littoral de Mornès (carotte MO)<sup>73</sup>;

<sup>70</sup> TRIAT-LAVAL, *Contribution pollenanalytique à l'histoire Tardi et Postglaciaire de la végétation de la basse vallée du Rhône.*

<sup>71</sup> *Ibidem.*

<sup>72</sup> ARNAUD-FASSETTA, *Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône.*

<sup>73</sup> ARNAUD-FASSETTA, *Quatre mille ans d'histoire hydrologique dans le delta du Rhône.*

- Vers 3300 BP: en arrière du cordon littoral de Mornès, formation puis remblaiement d'un bassin d'inondation fluvio-lagunaire à fluvio-palustre (carottes VIII et SF00)<sup>74</sup>; vers 3500 BP: extension du prodelta du Rhône de Saint-Ferréol (carotte SF). Celui-ci remplace par érosion les prodeltas préexistants dont les dépôts ne sont conservés que sur la marge orientale du delta (carottes BF6 et S1; 6000-5000 BP) et en amont (carotte SF10; 5450 BP).

La chronostratigraphie des prodeltas entre 6000 et 3500 BP indique donc un déplacement vers l'est, puis vers l'ouest des embouchures du Rhône.

Cette reconstitution paléoenvironnementale s'inscrit dans la phase climatique E (fig. 6 et 7)<sup>75</sup>. Celle-ci a pu être étudiée en plusieurs points du delta (Piton, Augery, BF6, Saint-Ferréol) tout en incorporant le début d'une action anthropique plus intense. Le nombre de taxons y est très élevé (plus de 130, dont les 90% pouvaient habiter le delta). La ripisylve est dominée par *Alnus*. Les pollens des végétaux des milieux aquatiques d'eau douce sont toujours très fréquents, à l'inverse des halophytes. La présence de cultures est davantage affirmée. Ce sont surtout les herbes qui apparaissent plus diversifiées, mais il est difficile de préciser si cela est la conséquence du refroidissement climatique ou plutôt de l'avancée notable du trait de côte (fig. 9D).

#### *Vers 2150-1750 BP (200 av. J.-C.-200 apr. J.-C.)*

Le niveau marin est très proche de sa situation actuelle. Le delta du Rhône connaît une avancée sans précédent vers le sud, alors même que se développent de nombreuses installations humaines sur les bourrelets alluviaux du Rhône<sup>76</sup>. Sa surface s'est accrue de 71% (record absolu) par rapport à la période précédente, atteignant 1310 km<sup>2</sup>, soit 72,2% de la surface deltaïque actuelle (fig. 9E). Le taux de progradation est élevé, compris entre 0,320 et 0,605 km<sup>2</sup>/a. Les milieux strictement continentaux, situés dans l'emprise de l'actuel périmètre deltaïque, ne représentent plus grand-chose (seulement 2,6% de la surface). En fait, l'essentiel de l'aire deltaïque est alors occupé par des milieux saumâtres-salés (885 km<sup>2</sup>, soit 67,5%) ou doux (425 km<sup>2</sup>, soit 32,5%).

Le drainage de la plaine ( $D_d = 0,16 \text{ km/km}^2$ ) se fait par trois branches principales: le Rhône de Peccaïs III à l'ouest, le Rhône de Saint-Ferréol III au centre, le Rhône d'Ulmet III à l'est. Un climat certainement plus humide, associé aux effets de l'anthropisation sur les interfluves en amont, est à l'origine d'une crise hydrosédimentaire<sup>77</sup>, reconnue par ailleurs à l'échelle de tout le bassin rhodanien<sup>78</sup>. Le lobe

<sup>74</sup> ARNAUD-FASSETTA, *Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône*; Gilles ARNAUD-FASSETTA *et al.*, «Evidence for an early landuse in the Rhône Delta (Mediterranean France) as recorded by late Holocene fluvial paleoenvironments (1640-100 BC)», dans *Geodinamica Acta*, 13 (2000), p. 377-389.

<sup>75</sup> SUC *et al.*, *Un atelier exceptionnel d'étude de la dynamique de la diversité végétale*.

<sup>76</sup> Gilles ARNAUD-FASSETTA, Corinne LANDURÉ, «Hydroclimatic hazards, vulnerability of societies and fluvial risk in the Rhône Delta (Mediterranean France) from the Greek period to the Early Middle Ages», dans Eric FOUACHE (éd.), *The Mediterranean World Environment and History*, Paris, 2003, p. 51-76.

<sup>77</sup> Gilles ARNAUD-FASSETTA, «Geomorphological records of a 'flood-dominated regime' in the Rhône Delta (France) between the 1<sup>st</sup> century BC and the 2<sup>nd</sup> century AD. What correlations with the catchment paleohydrology?», dans *Geodinamica Acta*, 15 (2002), p. 79-92.

<sup>78</sup> Mireille PROVANSAL *et al.*, «Le régime du Rhône dans l'Antiquité et au Haut Moyen Age», dans *Gallia*, 56 (1999), p. 13-32.

de Saint-Ferréol III connaît un développement sans précédent vers le sud, ce dont témoignent les épaves antiques échouées le long du front deltaïque (barre proximale) de l'époque<sup>79</sup>.

Au cours de l'Antiquité romaine puis du Moyen Age, la physiographie autant que l'hydrographie du delta du Rhône vont se modifier, notamment au niveau du front deltaïque. Malgré la stabilisation du niveau marin relatif (vers 1200-1000 BP), on sait que la progradation du delta s'est ralentie du fait de la division du réseau hydrographique en trois branches: le Rhône d'Albaron-Peccais III-IV à l'ouest, le Rhône de Saint-Ferréol III-IV dans la partie centrale et le Rhône d'Ulm III-IV à l'est<sup>80</sup>.

### *Au début du XVIII<sup>e</sup> siècle*

Le processus de progradation n'agit plus uniformément sur l'ensemble de la plaine deltaïque. Seul le lobe du Bras de Fer (1586-1712) connaît une avancée rapide (fig. 9F), alors que les fronts des lobes de Saint-Ferréol III et de Peccais III sont en cours de démantèlement et que deux défluviations majeures se sont produites, celle du Rhône de Saint-Ferréol IV (1440) et celle du Rhône de Peccais IV (1552). La densité de drainage a chuté considérablement ( $D_d = 0,09 \text{ km}^2/\text{km}^2$ ).

La progression rapide vers le sud du lobe du Bras de Fer s'explique essentiellement par des apports détritiques abondants, dans le contexte de la crise climatique du Petit Age Glaciaire, exacerbée par les effets de l'érosion des sols dans les montagnes fortement occupées<sup>81</sup>. Malgré le ralentissement relatif de la vitesse de progradation (0,211-0,267 km<sup>2</sup>/a) de l'ensemble de la plaine deltaïque, celle-ci représente 98,2% de la surface deltaïque actuelle, soit 1710 km<sup>2</sup> (tab. 1). L'aire deltaïque s'est accrue de 30,5% par rapport à la période précédente: 64% des milieux qui la composent sont saumâtres à salés, les 36% restants sont des milieux doux.

Les phases climatiques F et G (fig. 6 et 7)<sup>82</sup> sont insuffisamment documentées (Saint-Ferréol, BF6, carottes marines 92K08 et 92K04), surtout dans la partie sommitale de la phase F, avec peu de taxons (70 dans F, moins de 50 dans G, presque tous pouvant habiter le delta; fig. 6). La ripisylve semble toujours dominée par *Alnus*.

<sup>79</sup> LONG, ILLOUZE, «Nouvelles épaves de Camargue».

<sup>80</sup> Gilles ARNAUD-FASSETTA, Corinne LANDURÉ, «Occupation du sol et contraintes fluviales dans le delta du Rhône (France du Sud)», dans *Actes des XVII<sup>e</sup> Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes*, «La dynamique des paysages protohistoriques, antiques, médiévaux et modernes», Antibes, 19-21 octobre 1996, Sophia Antipolis, 1997, p. 285-308; ARNAUD-FASSETTA, *Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône*; ARNAUD-FASSETTA, *Quatre mille ans d'histoire hydrologique dans le delta du Rhône*; ARNAUD-FASSETTA, LANDURÉ, «Hydroclimatic hazards, vulnerability of societies and fluvial risk in the Rhône Delta»; Gilles ARNAUD-FASSETTA, *L'hydrogéomorphologie fluviale, des hauts bassins montagnards aux plaines côtières: entre géographie des risques, géoarchéologie et géosciences*, Habilitation à diriger des recherches (HDR) en géographie physique, Université Paris-Diderot (Paris 7), 2007, 3 vol. En ligne: <https://hal.archives-ouvertes.fr/> (consulté le 31 août 2015); Gilles ARNAUD-FASSETTA *et al.*, «Hydrogéomorphologie du site, paléoenvironnements et dynamique alluviale», dans Corinne LANDURÉ, Pierre ARCELIN, Gilles ARNAUD-FASSETTA (éd.), *Le village de La Capelière en Camargue (Arles, Bouches-du-Rhône) du début du V<sup>e</sup> s. av. n. è. à la période du Haut Moyen Age*, Aix-en-Provence, 2015, sous presse.

<sup>81</sup> Gilles ARNAUD-FASSETTA, Mireille PROVANSAL, «High frequency variations of water flux and sediment discharge during the Little Ice Age (1586-1725 AD) in the Rhône Delta (Mediterranean France). Relationship to the catchment basin», dans *Hydrobiologia*, 410 (1999), p. 241-250.

<sup>82</sup> SUC *et al.*, *Un atelier exceptionnel d'étude de la dynamique de la diversité végétale*.

La carotte marine 92K08 témoigne de l'augmentation de l'activité anthropique avant le Moyen Age, avec l'intensification de la culture d'*Olea*, *Juglans*, des céréales, Cannabaceae, *Vitis* et *Castanea* dans l'arrière-pays, sans que cela affecte sensiblement la diversité végétale (plus de 60 taxons, dont la plupart pouvaient vivre en Camargue). Dès lors, les halophytes s'étendent, tandis que les espaces à hydrophytes semblent se réduire.

La carotte marine 92K04 renseigne sommairement sur la période récente (63 taxons), c'est-à-dire les quatre derniers siècles, avec notamment l'intensification de l'oléiculture et, à un degré moindre, de la viticulture, le maintien de la culture du noyer et l'éloignement de celle du châtaigner.

### ***Phase 3 (aujourd'hui et demain): progradation contrariée***

#### *Aujourd'hui*

Le processus de progradation est fortement compromis. L'aire deltaïque ne s'est accrue que de 1,9% (0,107 km<sup>2</sup>/a) depuis le début du XVIII<sup>e</sup> siècle (tab. 1) et elle ne progresse plus qu'aux abords de l'embouchure du Grand Rhône et au niveau des flèches de Beauduc et de l'Espiguette<sup>83</sup>.

Un cloisonnement du delta s'opère par suite de la construction de deux ouvrages majeurs achevés dans la seconde partie du XIX<sup>e</sup> siècle: la Digue à la Mer (1856-1859) et les digues «insubmersibles» du Rhône (1869). Ces transformations vont totalement modifier l'hydraulique de la Camargue ainsi que les dynamiques sédimentaires fluviales<sup>84</sup> et marines<sup>85</sup>, dans un contexte où la densité de drainage continue de chuter pour atteindre son minimum holocène ( $D_d = 0,06$  km/km<sup>2</sup>).

Sur les 1742 km<sup>2</sup> qu'occupe aujourd'hui la plaine deltaïque, plus de la moitié (54,4%) correspond à des milieux saumâtres-salés, dont la végétation caractéristique a été décrite ci-dessus. L'étude de Ferrer<sup>86</sup> a permis d'affiner le découpage de ces milieux en proposant une subdivision en milieux doux à saumâtres (17,8%), saumâtres (11,6%) et salés (24,9%), ces derniers étant pour l'essentiel affectés à la saliculture (fig. 10G). Le delta est donc légèrement dominé par les milieux saumâtres à salés, mais le pompage de l'eau douce du Rhône, pour les besoins de la riziculture en particulier, a permis d'étendre le périmètre irrigué, de sorte que les milieux deltaïques doux sont aujourd'hui les plus étendus (45,6%) de toute l'histoire holocène de la Camargue.

Le site de la bouée de Roustan illustre clairement les variations thermiques depuis 1950 (phase climatique H, fig. 6 et fig. 7)<sup>87</sup>, au moyen d'un bon contrôle chronologique (plusieurs carottes successivement implantées au même endroit,

83 SABATIER, *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône*.

84 ARNAUD-FASSETTA, «River channel changes in the Rhône Delta».

85 François SABATIER, Serge SUANEZ, «Evolution of the Rhône delta coast since the end of the 19<sup>th</sup> century», dans *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 4 (2003), p. 283-300.

86 FERRER, *Activités humaines et gestion de l'eau. Conséquences d'une zone humide: la Camargue*.

87 BEAUDOUIN *et al.*, «Present-day rhythmic deposition in the Grand Rhône prodelta».

	MILIEU CONTINENTAL				MILIEUX DELTAÏQUES						
	Surface (en km <sup>2</sup> ) dans les limites du delta actuel. %/aujourd'hui	Variations surfaciques (en km <sup>2</sup> et %)	Taux de variation surfacique (en km <sup>2</sup> /a). Min. et max.	Surface totale (en km <sup>2</sup> ). %/aujourd'hui	Variations surfaciques (en km <sup>2</sup> et %)	Taux de variation surfacique (en km <sup>2</sup> /a). Min. et max.	Doux	Saumâtre (-)	Saumâtre (+)	Salé	Marin immergé (en km <sup>2</sup> ) dans les limites du delta actuel. %/aujourd'hui
Vers 9800 BP (9400-9200 av. J.-C.)	1132			629			112	517			113
	65.0%			36.1%			17.8%	82.2%			6.5%
Vers 7600 BP (6600-6200 av. J.-C.)	353	-780	-0.244	539	-90	-0.028	162	378			908
	20.2%	-68.9%	-0.300	31.0%	-14.3%	-0.035	29.9%	70.1%			52.1%
6500-5000 BP (5700-3600 av. J.-C.)	173	-180	-0.060	598	59	0.020	200	398			1005
	9.9%	-51.0%	-0.359	34.3%	10.9%	0.117	33.4%	66.6%			57.7%
4500-3000 BP (3500-1100 av. J.-C.)	110	-63	-0.014	766	168	0.037	273	493			886
	6.3%	-36.4%	-0.126	44.0%	28.1%	0.336	35.6%	64.4%			50.8%
2150-1750 BP (200 av. J.-C. - 200 apr. J.-C.)	46	-64	-0.017	1310	544	0.320	425	885			451
	2.6%	-58.4%	-0.071	75.2%	71.0%	0.605	32.5%	67.5%			25.9%
Début XVIII <sup>e</sup> siècle	0	-46	-0.024	1710	400	0.211	616	1094			85
	0.0%	-100.0%	-0.031	98.2%	30.5%	0.267	36.0%	64.0%			4.9%
Aujourd'hui	0	0		1742	32		795	947			0
								54.4%			
	0.0%	0.0%		100.0%	1.9%	0.107	45.6%	310	203	434	0.0%
Demain (scenario catastrophe)	0	0	0.000	1738	-5	-0.045	274	1464			4
	0.0%	0.0%		99.7%	-0.3%	-0.065	15.8%	84.2%			0.3%
Demain (scenario optimiste)	0	0		1738	-5	-0.045	795	943			4
	0.0%	0.0%		99.7%	-0.3%	-0.065	45.8%	54.2%			0.3%

Tableau 1. Quantification des variations surfaciques des milieux deltaïques rhodaniens et de leur bordure continentale de -10 000 ans à demain.

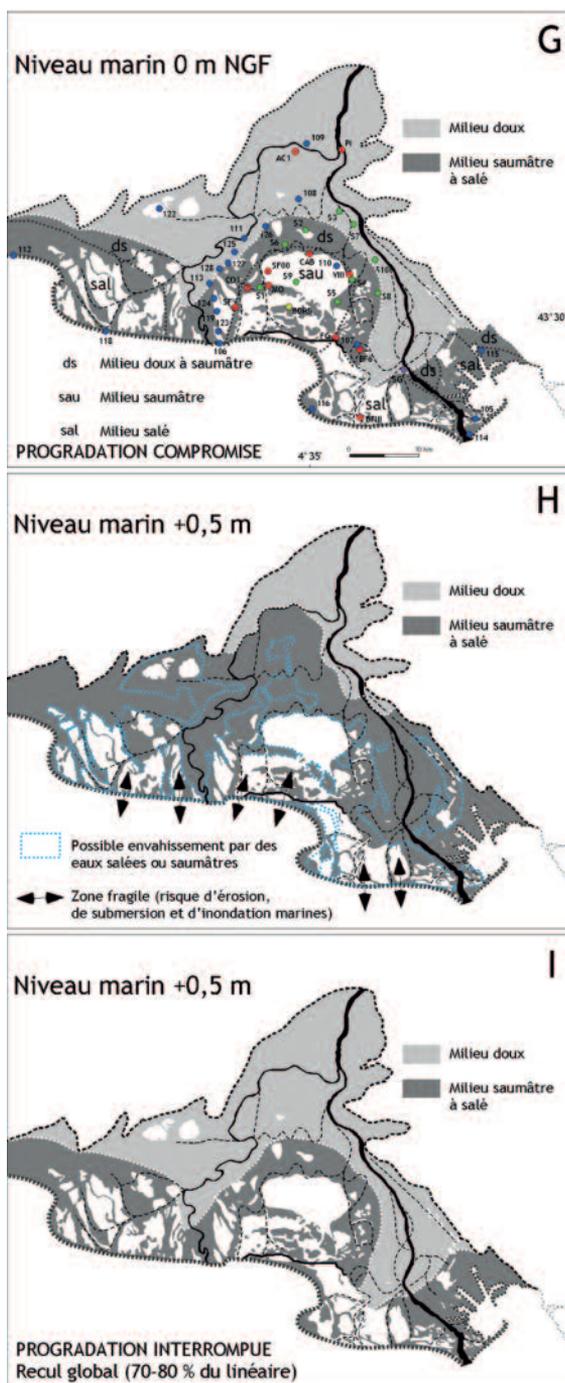


Fig. 10. Cartographie du delta du Rhône et de sa bordure continentale à différents stades de leur développement (deuxième partie). G: aujourd'hui; H: demain (d'ici 2030-2100), *scenario catastrophe*; I: demain (d'ici 2030-2100), *scenario optimiste*.

permettant des enregistrements superposables), sur la base d'un indicateur constitué par le nombre de grains de pollen des plantes thermophiles (les xérophytes méditerranéennes comme *Olea*, *Phillyrea*, *Pistacia*, d'une part, et les végétaux exotiques plantés par l'homme dans les jardins, comme *Accacia*, *Forsythia*, *Buddleja*, *Liquidambar*, *Taxodium*, etc., d'autre part). Leur courbe suit celle de la température moyenne annuelle dans l'hémisphère Nord<sup>88</sup>, avec des maxima de l'ordre de 3-4% dans les années 1990, s'élevant à des valeurs de l'ordre de 9-12% depuis. Cet indicateur signifie simplement que l'on enregistre dans le prodelta du Grand Rhône davantage de pollen de ces végétaux, soit parce qu'ils en produisent plus, soit parce que la population humaine régionale acquiert davantage de végétaux exotiques (subtropicaux et tropicaux) afin de les planter dans les jardins ou les mettre sous véranda (tout en les sortant au moment de la floraison).

### *Demain (d'ici 2030-2100)*

Le réchauffement de la basse atmosphère, amorcé depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, consécutif à la fin du Petit Age Glaciaire et très probablement renforcé par l'effet de serre additionnel d'origine humaine, devrait avoir des répercussions sur l'évolution des côtes dans le courant des prochaines décennies. En effet, la fonte partielle des calottes glaciaires et des glaciers de montagne, associée à l'expansion thermique du volume des eaux marines superficielles, provoquera logiquement une élévation du niveau moyen de la mer. Du fait de la part importante qu'y occupent les surfaces en eau (étangs, lagunes, marais) et les faibles reliefs qui les entourent, les aires deltaïques seront potentiellement exposées à l'élévation du niveau de la mer. Ainsi, les risques induits et combinés d'érosion, de submersion et d'inondation pourraient conduire, à terme, à une sévère révision de leurs limites géographiques et écologiques. Une étude menée par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement sur le delta du Nil révèle qu'une élévation de 0,5 m de la Méditerranée pourrait avoir une incidence sur 3,8 millions de personnes et provoquerait la perte de 1800 km<sup>2</sup> de terres<sup>89</sup>. Qu'en sera-t-il en Camargue?

En 2002, le Conservatoire du Littoral a lancé une étude<sup>90</sup> afin de réaliser une analyse prévisionnelle de la submersion et de l'évolution du trait de côte, sur la base d'une remontée prévisible du niveau moyen de la mer de 0,22 m d'ici 2050 et de 0,44 m (soit moins de 1 mm/a) d'ici 2100, valeurs qui se placent à l'intérieur d'une fourchette allant de 0,1 m à 0,8 m pour 2100. Pour la Camargue, les résultats de cette étude valident plusieurs hypothèses:

- 1) de tout le département des Bouches-du-Rhône, la Camargue sera la zone la plus concernée par le risque de submersion liée à la remontée du niveau marin;
- 2) si le niveau de la mer s'élève d'environ 0,5 m d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, la fréquence annuelle de retour d'une surcote de 1 m pourrait passer de 10 à 100%;

<sup>88</sup> Thomas CROWLEY, «Causes of climate change over the past 1000 years», dans *Science*, 289 (2000), p. 270-276.

<sup>89</sup> <http://www.unep.org/french/climatechange/> (consulté le 31 août 2015).

<sup>90</sup> Christine CLUS-AUBY, Roland PASKOFF, Fernand VERGER, *Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du Littoral, Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100*, 2004, site Internet: [www.conservatoire-du-littoral.fr](http://www.conservatoire-du-littoral.fr) (consulté le 31 août 2015).

- 3) les risques d'inondation, d'érosion et de disparition des zones humides augmenteront considérablement, avec de lourdes conséquences pour les activités humaines, l'industrie, le tourisme, l'agriculture et les habitats naturels côtiers;
- 4) à proximité de la frange littorale, de nombreux sites seront touchés autant par les inondations du Rhône que par les submersions d'origine marine. En effet, l'élévation du niveau marin et les surcotes dues aux vents de mer contrarieront l'écoulement du fleuve, entraînant des inondations polygéniques;
- 5) une accélération de l'érosion des plages, une extension des submersions temporaires ou permanentes des dépressions laguno-palustres et une accentuation de la salinisation des nappes aquifères sont également attendues.

Cependant, pour Sabatier et Provansal<sup>91</sup>, la montée du niveau marin n'est à considérer que comme un facteur aggravant du recul global (70-80% du linéaire) de la côte, déjà amorcé depuis plusieurs décennies. La montée du niveau marin ne participerait qu'à hauteur de 10% environ au phénomène de recul du rivage deltaïque observé depuis un siècle. L'érosion côtière s'explique avant tout par la variabilité des forces de houle réparties sur la côte et la réduction (depuis la fin du Petit Age Glaciaire) des apports en sédiments par le Rhône, dont les deux millions de tonnes de sables annuels ne parviennent pas à s'épandre au-delà du «grand périmètre» des embouchures, au détriment de l'alimentation du reste des plages du littoral.

De ce fait, les effets hydrogéomorphologiques attendus restent préoccupants<sup>92</sup>:

- 1) le village des Saintes-Maries-de-la-Mer pourrait bien être entouré par les eaux marines;
- 2) la moitié méridionale du delta risque d'être submergée (30% de la surface est à une altitude inférieure à 0,5 m NGF). La remontée de la nappe d'eau salée, entamée déjà depuis plusieurs années dans les étangs méridionaux, pourrait finir par atteindre la Camargue rizicole;
- 3) l'élévation du niveau marin, en réduisant la largeur des plages, accroîtra leur fragilité et portera plus haut le niveau des surcotes et des houles de tempête, créant des risques de rupture des cordons littoraux puis de submersion des terres. Dans le Golfe de Beauduc, la ligne de rivage située à l'ouest du phare de La Gachole se rapprochera de la Digue à la Mer. Ainsi, bon nombre de dunes reliques seront détruites et les tempêtes et les inondations marines atteindront le pied de la digue, dont la déstabilisation pourra favoriser des intrusions d'eau de mer dans l'étang de Vaccarès;
- 4) aux embouchures des deux bras du fleuve, la montée plus rapide du niveau marin ralentira l'évacuation des eaux de crue, menaçant ainsi les villes des Saintes-Maries-de-la-Mer et de Port-Saint-Louis-du-Rhône;
- 5) une simulation (*scenario* A2, modèle ARPEGE) a permis de projeter le devenir de la distribution géographique de deux espèces thermophiles méditerranéennes (*Olea europaea* et *Ceratonia siliqua*) dans le cadre du réchauffement climatique: ces taxons deviendraient moins productifs dans leur aire de distribution respec-

<sup>91</sup> François SABATIER, Mireille PROVANSAL, «La Camargue sera-t-elle submergée?», dans *La Recherche*, 355 (2002), p. 72-73.

<sup>92</sup> SABATIER, *Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône*.

tive actuelle et auraient tendance à s'étendre à de nouvelles zones plus septentrionales, mais avec une faible productivité<sup>93</sup>.

Face à cela, plusieurs stratégies d'adaptation seront possibles: (se) protéger à n'importe quel prix (maintenir la ligne de rivage, multiplier les pompes d'eau douce dans le Rhône), composer avec et contrôler (intervention limitée ou aménagement en retrait) ou se retirer (irréaliste?). Quant à prévoir ce que seront la géographie du delta du Rhône et la carte du risque dans 30 à 100 ans, cela reste une tâche difficile, étant donné l'inégale fragilité des plages face à l'importante mobilité longitudinale des sables et à la complexité des effets des houles, ainsi que la quasi-impossibilité de diagnostiquer précisément où se porteront les enjeux et les intérêts économiques et culturels dans le delta au cours des prochaines décennies, enjeux et intérêts dont vont dépendre la nature et le volume des moyens de défense mobilisés.

Nous envisageons donc deux *scenarii*, le premier «catastrophiste», pour lequel ce qui a été décrit et analysé par les spécialistes se produit, sans que l'on y puisse ou veuille rien faire. La figure 10H montre ce que pourraient être alors les effets sur la diversité végétale, qui subirait un risque accru de réduction de certaines espèces vulnérables (milieux doux). La transition doux/saumâtre-salé se retrouverait alors comme il y a 6000 ans... En revanche, les contours du trait de côte (ou plutôt l'enveloppe externe des surfaces directement submergées par les eaux marines) ne pourront suivre que très difficilement l'isohypse 0,5 m telle que Petit-Maire et Marchand<sup>94</sup> l'avaient dessiné, il y a de cela 24 ans.

Un second *scenario* plus «optimiste» (fig. 10I) s'appuie sur l'idée que les enjeux actuels dans le delta seront jugés suffisamment importants (c'est-à-dire rentables) et durables pour que tous les moyens soient mis en œuvre afin de les préserver (Saintes-Maries-de-la-Mer, Digue à la Mer, Salins du Midi, etc.). Dans ce cas, la diversité végétale ne serait modifiée que sur une étroite bande littorale.

Les réponses permettant de résoudre des questions complexes étant rarement tranchées, il y a fort à parier qu'ici encore, la solution la mieux adaptée sera un compromis entre ces deux *scenarii* extrêmes.

## Conclusions

Cette étude montre que les grandes étapes de la construction holocène du delta du Rhône ont pu être complétées et quelquefois corrigées grâce à l'acquisition de nouvelles données chronostratigraphiques et à un gros travail de synthèse que nous avons réalisé en revisitant les carottages profonds effectués dans le delta il y a plus de quarante ans pour certains. Rien n'aurait pu être fait sans l'apport de ces données antérieures et le recours systématique à l'interdisciplinarité.

Nous rappelons ci-dessous en huit points les principaux résultats, qui présentent une valeur certaine pour qui s'intéresse aux relations milieux-sociétés en Camargue

<sup>93</sup> SUC *et al.*, *Un atelier exceptionnel d'étude de la dynamique de la diversité végétale*. Ce résultat s'accorde avec les estimations formulées par Pierre QUÉZEL, Frédéric MÉDAIL, *Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*, Paris, 2003.

<sup>94</sup> Nicole PETIT-MAIRE, Jacques MARCHAND, «La Camargue au XXI<sup>e</sup> siècle», dans *La Recherche*, 22 (1991), p. 976-978.

vues sous l'angle naturaliste, à leur mise en perspective avec le fonctionnement hydrodynamique et à leur valorisation pour comprendre la contrainte fluviale exercée par le Rhône sur les sociétés.

1) Le delta du Rhône s'est construit en deux phases, du reste assez caractéristiques des plaines deltaïques du pourtour méditerranéen<sup>95</sup>:

- jusqu'à 7600 BP (6600-6200 av. J.-C.), le delta subit un phénomène de rétrogradation-aggradation, dans un contexte de remontée rapide du niveau marin (accroissement important de l'espace d'accommodation, houles efficaces) et d'apports détritiques abondants;
- à partir de 6500 BP (5700 av. J.-C.), la plaine deltaïque est marquée par la progradation et l'aggradation, dans un contexte de décélération lente (6500-5000 BP; 5700-3600 av. J.-C.), puis rapide (à partir de 4500-3000 BP; 3500-1100 av. J.-C.) de la vitesse de remontée du niveau marin, avant sa stabilisation vers la fin du haut Moyen Age, et d'apports sédimentaires variables, dont les fluctuations sont liées aux crises hydro-climatiques et aux effets de l'anthropisation dans le bassin versant.

Au total, la surface du delta du Rhône s'est considérablement accrue (+177%), passant de 629 km<sup>2</sup> vers 9800 BP (9400-9200 av. J.-C.) à 1742 km<sup>2</sup> de nos jours. Aujourd'hui et demain, la remontée lente du niveau marin et la réduction des apports sédimentaires risquent de compromettre fortement sa progradation.

2) Tout comme la géométrie de la plaine deltaïque et les conditions de salinité, le rapport des surfaces continent/delta a considérablement varié:

- vers 9800 BP (9400-9200 av. J.-C.), il est largement en faveur du continent, qui occupe 65% (1132 km<sup>2</sup>) de la surface deltaïque actuelle. Si l'on y ajoute les milieux doux (112 km<sup>2</sup>) présents dans l'aire deltaïque *stricto sensu*, on estime que les milieux doux occupent alors 1244 km<sup>2</sup>, soit 71% de l'emprise du delta actuel. C'est un maximum qui ne sera jamais plus dépassé.
- A partir de cette date, mais surtout à partir de 7600 BP (6600-6200 av. J.-C.), l'édification progressive du prisme progradant contribue à l'extension de l'aire deltaïque, au détriment des milieux continentaux en voie de résorption. Au total, les milieux doux (tous milieux confondus) vont se réduire progressivement jusqu'à atteindre un minimum (373 km<sup>2</sup>) vers 6500-5000 BP (5700-3600 av. J.-C.). Ils vont ensuite connaître une progression lente et plus ou moins continue, au fur et à mesure de la progradation du prisme deltaïque, pour atteindre aujourd'hui 795 km<sup>2</sup>.

Dans un futur proche, le risque de voir se réduire les surfaces en eau douce n'est pas nul. La probabilité qu'il se réalise dépend pour beaucoup des effets que vont avoir les probables surcotes et tempêtes (changement climatique, montée du niveau marin) sur un littoral déjà fragilisé par des houles agressives, qui agissent sur des plages dont plus des trois quarts sont en état de déficit sédimentaire depuis plusieurs années. Ainsi, les milieux doux pourraient passer de 795 km<sup>2</sup> (minimum) à 274 km<sup>2</sup> (maximum), affectant les conditions actuelles de diversité végétale.

<sup>95</sup> Daniel STANLEY, Andrew WARNE, «Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise», dans *Science*, 265 (1994), p. 228-231.

- 3) L'extension du prisme progradant, à partir de 6500 BP (5700 av. J.-C.), a été suivie d'une densification du drainage entre 6500 BP (5700 av. J.-C.) et 3000 BP (1100 av. J.-C.). La multiplication des bras fluviaux a sans doute été favorable au développement de la forêt riveraine. L'utilisation massive du bois par les sociétés antiques<sup>96</sup>, puis la fermeture artificielle de nombreux bras du Rhône à partir du bas Moyen Age ont sans doute contribué à la réduction de ces linéaires forestiers.
- 4) Du point de vue de la biodiversité et après une mise en perspective des données géomorphologiques et polliniques, nous avançons les hypothèses suivantes:
  - vers 9800 BP (9400-9200 av. J.-C.): forte biodiversité (delta laguno-marin, mais abondance de l'eau douce sur le continent proche);
  - vers 7600 BP (6600-6200 av. J.-C.): diminution considérable (surtout au sud) de la biodiversité (réduction des milieux continentaux, delta rétrogradant peu développé);
  - vers 6500-5000 BP (5700-3600 av. J.-C.): légère augmentation de la biodiversité, par accroissement des milieux saumâtres essentiellement;
  - vers 4500-3000 BP (3500-1100 av. J.-C.): augmentation de la biodiversité, par rééquilibrage entre milieux doux et milieux saumâtres-salés;
  - vers 2150-1750 BP (200 av. J.-C.-200 apr. J.-C.): la biodiversité pourrait être très forte en raison de l'accroissement des milieux d'eau douce et saumâtre, mais elle a pu être compromise par la pression anthropique (utilisation des bois de ripisylve);
  - début du XVIII<sup>e</sup> siècle: la biodiversité pourrait être très forte en raison de l'accroissement des milieux d'eau douce et saumâtre, mais elle a pu être compromise par la pression anthropique (utilisation des bois de ripisylve, développement des salines);
  - aujourd'hui: biodiversité forte, due à l'extension des surfaces irriguées, à l'introduction des plantes exotiques (espèces invasives) et à la prolifération des herbes (origine anthropique);
  - demain: biodiversité compromise s'il y a extension des surfaces en eau salée-saumâtre, due à l'érosion littorale exacerbée par l'actuelle montée du niveau marin.
- 5) La diversité floristique de la Camargue n'a été que modérément affectée par les changements climatiques globaux entre le Dryas récent et le Petit Age Glaciaire. Lors des phases les plus chaudes, il semble que des milieux arborés (à *Quercus* décidus, *Corylus* et *Tilia* notamment) aient pu habiter les secteurs les plus proximaux du delta. En revanche, la diversité végétale a été très sensible aux modifications édaphiques locales, en relation avec l'évolution de la géométrie de la plaine deltaïque, de la proximité du trait de côte et du coin salé, et de l'hydrographie rhodanienne.

<sup>96</sup> Comme l'ont montré les travaux d'Arnaud-Fassetta et Chabal sur le site du Carrelet (Gilles ARNAUD-FASSETTA, Lucie CHABAL, «Evolution des paléoenvironnements fluviaux dans la plaine deltaïque du Rhône de l'Antiquité au haut Moyen Age d'après la géomorphologie et l'anthracologie», dans *Actes du Colloque «Crau, Alpilles et Camargue. Histoire et Archéologie»*, Arles, novembre 1995, Arles, 1997, p. 13-29.

- 6) L'analyse pollinique montre, s'il en est encore besoin, sa grande finesse pour établir des corrélations avec l'évolution climatique globale (fig. 7). De ce point de vue, les enregistrements camarguais s'enrichiront assurément par l'achèvement de l'analyse de la carotte Fangassier (Rhône de Saint-Ferréol), puis la transposition à partir des diagrammes (en l'absence de comptages disponibles) des données acquises par Triat-Laval<sup>97</sup>.
- 7) L'action anthropique semble avoir modifié assez considérablement les écosystèmes végétaux camarguais. L'étude historique des milieux camarguais montre une très forte régression des espaces naturels, passant de 90% en l'an 1800 à moins de 30% aujourd'hui. Malgré la progression de la protection de l'environnement depuis les années 1930, celle-ci n'a pas constitué un frein suffisant face à l'essor de l'agriculture et du tourisme (et à une évolution de ce dernier vers un style moins sédentaire). Aujourd'hui, on peut considérer que seulement 180 km<sup>2</sup> sont fortement protégés par des mesures réglementaires et foncières, ce qui ne représente qu'un quart de la Camargue. Il reste essentiel de contenir l'impact du tourisme et de freiner l'expansion de l'exploitation économique des terres, par exemple en rendant obligatoirement au domaine «public» les terrains «privés» qui viendraient à être abandonnés.
- 8) Pour finir, l'étude a montré que le réseau hydrographique n'a eu de cesse d'évoluer au cours des dix derniers millénaires<sup>98</sup>. Au début de la période considérée (9800 BP; 9400-9200 av. J.-C.), le relief différencié (en partie hérité du Pléistocène) de la plaine deltaïque contraint le Rhône à s'écouler dans des paléo-vallées (rias) bien encaissées presque jusqu'aux embouchures. A partir de 7600 BP (6600-6200 av. J.-C.), les paléochenaux vont échapper au contrôle des héritages morphologiques du fait des vitesses d'aggradation très fortes, qui permettent d'uniformiser la topographie. Dès lors, le réseau hydrographique va se subdiviser par défluviation et ce, d'autant plus facilement que les vitesses d'aggradation restent soutenues, que la surface de la plaine s'accroît en même temps que sa pente s'atténue et que le niveau marin n'est pas encore tout à fait stabilisé.

L'étude a donc permis de préciser les conditions physiques face auxquelles les sociétés se sont trouvées lors de leur installation dans la plaine deltaïque. Sans s'étendre sur ces conditions ni entrer dans un discours déterministe qui forcément ferait polémique, que montre l'étude?

- Avant 6500-5000 BP (5700-3600 av. J.-C.), le delta semble trop «en mouvement» et rétrogradant pour permettre une installation durable sur les bords du fleuve et dans la plaine en général.
- L'installation des sociétés, qui remonte au VI<sup>e</sup> siècle av. J.-C., est précédée de plusieurs siècles durant lesquels les conditions paléogéographiques ont pu être somme toute assez proches de celles qui sont contemporaines de l'instal-

<sup>97</sup> TRIAT-LAVAL, *Contribution pollenanalytique à l'histoire Tardi et Postglaciaire de la végétation de la basse vallée du Rhône*.

<sup>98</sup> L'étude s'est bornée à quantifier cette évolution par le nombre, la longueur et la position des bras ainsi que par la densité de drainage. L'évolution hydrologique et hydraulique des (paléo)chenaux du Rhône n'a pas été abordée (voir ARNAUD-FASSETTA, LANDURÉ, «Fluvial risk in rural areas from the Greek period to the early Middle Ages»).

lation<sup>99</sup>. Faut-il supposer pour autant que resteraient à découvrir dans le delta des sites de l'Age du Bronze, voire antérieurs? C'est en tout cas ce qu'avait laissé envisager Philippe Leveau<sup>100</sup>, après la mise en évidence par la palynologie d'un champ de céréales (*i.e.* espèces cultivées) sur le site du Pont Noir, certainement antérieur à l'époque grecque... Il se peut aussi que les vitesses d'aggradation élevées (ce qui signifie inondations fréquentes) dans la plaine deltaïque, qui accompagnent encore la remontée du niveau marin, soient une réelle contrainte à l'installation durable des sociétés sur les paléobourrelets alluviaux, du moins sur les tronçons situés dans la partie méridionale du delta.

- Le tournant de notre ère (c'est-à-dire le début de l'Antiquité romaine) correspond à une phase où le delta prograde considérablement. Le taux de progradation est même le plus élevé qui soit enregistré à l'Holocène, permettant ainsi à la plaine de passer d'une surface de 766 km<sup>2</sup> à 1310 km<sup>2</sup> (+71%). Cette période correspond également au plus grand nombre de sites créés dans le delta<sup>101</sup>.

<sup>99</sup> *Ibidem*.

<sup>100</sup> Dans ARNAUD-FASSETTA *et al.*, «Evidence for an early landuse in the Rhône Delta».

<sup>101</sup> ARNAUD-FASSETTA, LANDURÉ, «Fluvial risk in rural areas from the Greek period to the early Middle Ages».