



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 143–150



Tectonics

Salt tectonics, a controlling factor on the development of the Marseilles and Grand-Rhone sedimentary ridges, Gulf of Lions, western Mediterranean Sea [☆]

Antonio Tadeu dos Reis ^{a,*}, Christian Gorini ^b, Alain Mauffret ^c, Wiktor Weibull ^a

^a *Departamento de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro/UERJ-Brazil, Rua São Francisco Xavier, 524, 4º Andar, Maracanã, Rio de Janeiro-RJ, Brazil, CEP: 22550-900*

^b *Laboratoire des processus et bilans des domaines sédimentaires, université des sciences et technologies de Lille1/UNST, bât. SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq, France*

^c *Laboratoire de tectonique, université Pierre-et-Marie-Curie, Paris-6, 4, place Jussieu, tour 26-0, case 129, 75252 Paris cedex, France*

Received 26 May 2003; accepted 28 October 2003

Presented by Michel Durand-Delga

Abstract

The Marseilles (also called Marseilles/Planier) and Grand Rhone sedimentary ridges, offshore the Gulf of Lions, western Mediterranean Sea, are generated by sediment spillover funnelled by the Marseilles and Grand-Rhone canyons, respectively. We show that the Marseilles and Grand-Rhone canyon directions are tectonically conditioned by Plio-Quaternary salt-induced sea-floor relief. Overburden extension in the area created an assemblage of listric faults running parallel to the strike of the continental margin. This salt-induced topography resulted in accentuated fault scarps impacting the sea-floor morphology and forcing submarine valleys to deflect to the east. Gravity-induced extension equally influenced the morphological pattern of the valley overbanking deposits. Sediment spillover occurred on both flanks of the canyons, but because active faulting generated space accommodation for overflow deposits, it inhibited the development of typical levee morphology along the canyons' left flanks. *To cite this article: A.T. dos Reis, C. R. Geoscience 336 (2004).*

© 2003 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Résumé

Rôle de la tectonique salifère dans la construction des rides sédimentaires de Marseille et du Grand Rhône, golfe du Lion, Méditerranée occidentale. La ride sédimentaire de Marseille (également nommée de Marseille/Planier) et celle du Grand Rhône, localisées au large de la marge sud-provençale du golfe du Lion, correspondent à des apports détritiques en provenance, respectivement, des canyons de Marseille et du Grand Rhône. Notre étude montre qu'un aspect commun à ces rides est le contrôle structural exercé par la tectonique salifère sur l'orientation de ces axes d'apport sédimentaire et sur le confinement des dépo-centres des rides elles-mêmes. Dans leurs passages par la zone des failles, les vallées sont détournées vers l'est, piégées par le jeu permanent des structures extensives salifères. Leurs morphologies sont cependant distinctes, ces différences relevant de la nature locale du contrôle tectono-sédimentaire. *Pour citer cet article : A.T. dos Reis, C. R. Geoscience 336 (2004).*

[☆] This is publication No. 2029 of GDR Marges.

* Corresponding author.

E-mail address: treis@uerj.br (A.T. dos Reis).

© 2003 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Keywords: Marseilles and Grand-Rhone ridges; salt tectonics; salt–sediment interaction; Gulf of Lions; France

Mots-clés : rides de Marseille et du Grand Rhône ; tectonique salifère ; interaction sel–sédiment ; golfe du Lion ; France

Version française abrégée

1. Introduction

La marge Sud-Provençale du golfe du Lion, Méditerranée occidentale (Figs. 1 et 2), correspond à une région sous l'influence des apports détritiques en provenance des canyons du Grand Rhône et de Marseille/Planier. Les dépôts associés à ces canyons s'organisent en rides sédimentaires asymétriques, qui longent en général le flanc droit des vallées. Coutellier [4] et Bellaïche et al. [1] suggèrent un contrôle direct des accidents profonds de la tectonique crustale d'âge Oligo-Aquitainien sur l'orientation est–ouest des canyons et des rides. En outre, l'asymétrie des rides est couramment attribuée à l'intervention de la force de Coriolis, qui favorise le développement des levées droites des canyons dans l'hémisphère nord [1,4]. En revanche, notre étude montre qu'un aspect commun à ces rides est le contrôle structural exercé par la tectonique salifère sur l'orientation des axes d'apport sédimentaire et sur l'asymétrie des rides elles-mêmes. Notre étude est basée sur la sismique réflexion multi-trace et des forages pétroliers (puits de forage GLP1, GLP2 et Autan) et elle est réalisée dans le cadre du programme GDR «Marges golfe du Lion».

2. La tectonique salifère dans le golfe du Lion

La zone d'étude se trouve dans la province extensive [6,7] de la tectonique salifère, au large de la marge Sud-Provençale (Fig. 3). Dans ce secteur, les failles listriques synthétiques (à regard vers le sud et/ou le sud–est) sont les traits structuraux majeurs au pied du talus et sur le glacis continental. La direction de ces failles est globalement perpendiculaire aux directions de pente du substratum anté-salifère [6]. Au sein des nappes gravitaires, les plans de failles SW–NE se relient par recouvrement partiel [6], à l'exemple des modèles analogiques [7,11] (Fig. 3). On vérifie également un changement au niveau spatial et temporel dans le fonctionnement des failles listriques entre le

Pliocène et le Quaternaire. Pendant le début du Quaternaire, le fonctionnement du système poursuit celui du Pliocène : l'extension se concentre à l'aval. Par la suite, lors des changements dans les aires de dépôt des unités quaternaires, le retrait des axes de transfert sédimentaire vers l'amont du système (la pente) provoque, au fur et à mesure de la migration, le remplissage successif des compartiments des failles distales. Ces failles distales deviennent progressivement inactives, tandis que l'extension migre vers le nord du système. Les failles proximales développent alors des escarpements de 30–50 m de dénivelé, entraînant l'affaissement des compartiments des failles dans une morphologie «échelonnée» du fond sous-marin (Fig. 4).

3. Interaction entre tectonique salifère et sédimentation dans la construction des rides sédimentaires de Marseille et du Grand Rhône

La direction SW–NE et est–ouest de failles listriques dans le domaine sud-provençal a entraîné le détournement des vallées de Marseille et du Grand Rhône vers l'est. À la suite de ce détournement, les canyons entrent alors dans le domaine du réseau de failles listriques et seront toujours guidés par ces accidents salifères extensifs dans leurs trajets vers le bassin profond (Fig. 3). Les compartiments de failles proximales, caractérisés par des blocs étroits, en forme de «marche d'escalier», exercent un contrôle structural relativement faible, mais suffisant pour que les chenaux prennent une direction d'abord WNW–ESE. Vers le bassin profond, la direction des vallées, devenue finalement nettement est–ouest, est due à leur confinement le long de failles listriques qui délimitent les larges compartiments de failles en rotation (*rollovers*) du domaine du glacis continental. C'est donc le piégeage des vallées du Grand Rhône et de Marseille par la disposition en relais des failles listriques qui explique le tracé en «baïonnette» de leurs cours, comme on l'a cartographié dans cette étude (Fig. 3).

La ride de Marseille s'étend sur environ 90 km dans la zone d'étude et diminue progressivement en hau-

teur et en largeur vers l'est (Fig. 4). Nous observons des faciès sismiques de levée (litage régulier), sous forme de coins sédimentaires en éventail qui remplissent les compartiments de failles en amont de la vallée (Figs. 3 et 4B–G), le piégeage des dépôts de débordement (sur les flancs gauches) dans les *rollovers* empêchant le développement d'une morphologie de levée (Fig. 4). Sur l'autre rive, le développement de la levée droite est, au contraire, favorisé par sa mise en place sur des blocs de failles plus stables (Figs. 3 et 4B–G). La ride du Grand Rhône, de taille plus modeste que la précédente, semble cependant soumise à un double contrôle, à la fois structural et morphosédimentaire. Nos données montrent qu'une levée gauche borde également la vallée au nord, mais le développement de cette levée est entravée par la barrière topographique représentant la ride de Marseille, localement surdéveloppée (Figs. 3 et 4A–B). Ainsi, les sédiments les plus récents de la ride du Grand Rhône (série supérieure) doivent être considérés comme un système turbiditique classique à deux levées : au fur et à mesure que la topographie de la ride de Marseille s'adoucit vers l'est, on voit la construction progressive de la levée gauche du Grand Rhône et l'élargissement du système turbiditique (Figs. 3 et 4C–F).

Le contrôle tectonosédimentaire proposé des structures extensives salifères sur la construction de la ride de Marseille est différent de celui invoqué par d'autres auteurs pour expliquer l'orientation de la vallée et de la ride. Coutellier [4] et Bellaïche et al. [1] suggèrent un contrôle direct de la limite nord de la vallée par des accidents profonds de la tectonique crustale, tandis que le confinement des levées sur le versant droit serait induit par des « bombements salifères ». L'analyse de données sismiques a montré l'absence de failles crustales qui, traversant la série miocène, affecteraient le Plio-Quaternaire. En outre, les coussins et dômes de sel ne sont présents qu'au sud-ouest du cadre géographique de notre étude.

4. Conclusions

Le rôle de failles listriques peut être important lorsqu'elles se placent sur le chemin des axes d'apport sédimentaire, en modifiant ainsi le tracé des canyons et/ou des systèmes chenalisants. En dépit du caractère local de ces structures, la capture des axes d'apport sédimentaire entraîne la déviation des matériaux détri-

tiques et peut donc déterminer la localisation et/ou la configuration des dépo-centres. La direction générale est-ouest des vallées du Grand Rhône et de Marseille/Planier est une empreinte directe de ces structures extensives de la marge Sud-Provençale. La modification dans la direction des cours des vallées du Grand Rhône et de Marseille est également accompagnée d'un changement dans la morphologie et la dimension de leurs dépôts latéraux de débordement, respectivement les rides du Grand Rhône et de Marseille. Par exemple, la construction préférentielle de la levée droite de la vallée de Marseille relève d'une situation structurale différente sur les deux flancs de la vallée, ceci étant également dû à la tectonique salifère. Les dépôts de débordement sur le flanc gauche de la vallée sont piégés dans les *rollovers*, créés par le jeu permanent de failles listriques, empêchant le développement d'une morphologie typique de levée. Par conséquent, la force de Coriolis n'est pas dans cette étude considérée comme le mécanisme responsable de la morphologie asymétrique des rides sédimentaires au large de la marge Sud-Provençale.

1. Introduction

Offshore the South Provençal margin, in the Gulf of Lions – Western Mediterranean Sea, the Marseilles and Grand-Rhone sedimentary ridges are directly related to turbidity currents that spill out of, respectively, the Marseilles and Grand-Rhone canyon/valley systems (Figs. 1 and 2). According to Bellaïche et al. [1], these ridges are a clear example of deep-water depositional systems, constructed during sea level lowering. The Marseilles and Grand-Rhone canyons exhibit a general east–west trend, approximately parallel to the South Provençal margin (Figs. 2 and 3). Both sedimentary ridges have been reported to be asymmetrical, as a result of preferential deposition on the right flanks of canyons. The most developed is the ridge flanking the Marseilles canyon. According to Coutellier [4], Oligo-Aquitania basement faults would account for canyons trending east–west, and implicitly for the ridge orientation itself. The same author also argued that the southern limit of the Marseilles ridge was partially blocked by linear diapiric salt barriers. However, this scenario seems rather unlikely, as our data set shows that deep-seated faults do not affect the

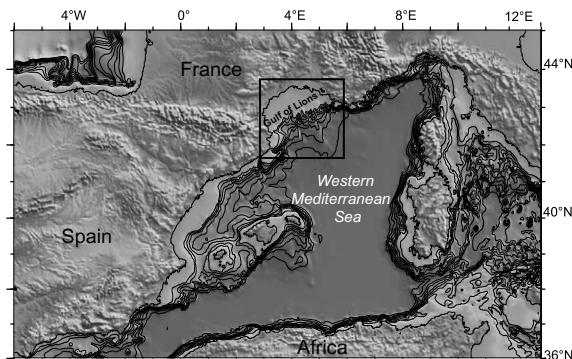


Fig. 1. Regional map of the western Mediterranean Sea (after GTOPO30 data, [10]).

Fig. 1. Carte régionale de la Méditerranée occidentale (d'après les données GTOPO30, [10]).

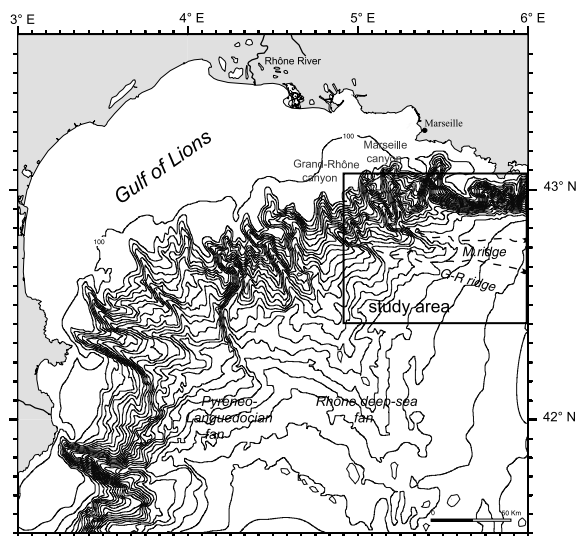


Fig. 2. Location map of the study area, showing the deep-water depositional systems offshore Gulf of Lions.

Fig. 2. Carte de localisation de la zone d'étude, illustrant les systèmes sédimentaires profonds au large du golfe du Lion.

Plio-Quaternary sedimentary cover, nor do salt domes exist in this area (Fig. 3).

In this study, we use high resolution seismic profiling and exploration wells (Autan, GLP2 and GLP1) to identify salt-structural processes that have been poorly understood until now in the Gulf of Lions. We suggest that the Marseilles and Grand-Rhone canyon di-

rections, as well as their ridges, are tectonically conditioned by salt-induced sea-floor relief.

2. Salt tectonics on the South Provencal margin

Plio-Quaternary salt-structural evolution of the Gulf of Lions was primarily controlled by gravity gliding–spreading over a Messinian salt detachment. Thin-skinned extension produced three main tectono-stratigraphic provinces [6,7], as identified on passive margin basins [2,3,5,8,9]: an uppermost Listic Fault Province, an intermediate Rigid Gliding Province and a lowermost Salt Dome Province. The Listic Fault Province is dominated by basinward-dipping faults and expanded stratigraphic wedges. Fault strike is dominantly parallel to subparallel to the shelf break. Downslope, the Rigid Gliding Province is characterized by a rather tabular salt layer, and the overlying sediments remain parallel to the top of the salt. In the Salt Dome Province, relative bathymetric lows between salt diapirs form local sediment thickenings.

Additionally, detailed structural and stratigraphic analysis of salt provinces indicate that thin-skinned extension offshore Gulf of Lions operates under the influence of: (a) basement topography below the salt layer, (b) thickness variations of the original salt basin, (c) volume of sediment input, and (d) time and space shifts of main depocenters [6]. The combination of all these factors resulted in a variety of structural styles documented in individual, and sometimes contrasting, salt-structural subsystems along the extensional zone: the South Provencal Domain, the Rhodanian Grabens Domain, the Pyreneo-Languedocian Sub-basin Domain, and the La Fonera Sub-basin Domain [6].

As elsewhere gulf-wide, overburden extension within the South Provencal domain created a characteristic assemblage of listric faults running parallel to subparallel to the strike of the continental margin. In the South Provencal domain, most of the Pliocene families of basinward-dipping faults remained unchanged and active all through the Quaternary. Fault surfaces are highly curved and form anastomosing relays. Up-dip, block compartments are narrow (1–2 km) while listric faults are as long as 20–50 km (Fig. 3). These proximal fault arrays remained active all through Plio-Quaternary deposition. Active faulting resulted in accentuated fault scarps up to tens of meters high, significantly impacting the sea-floor morphology (Fig. 4).

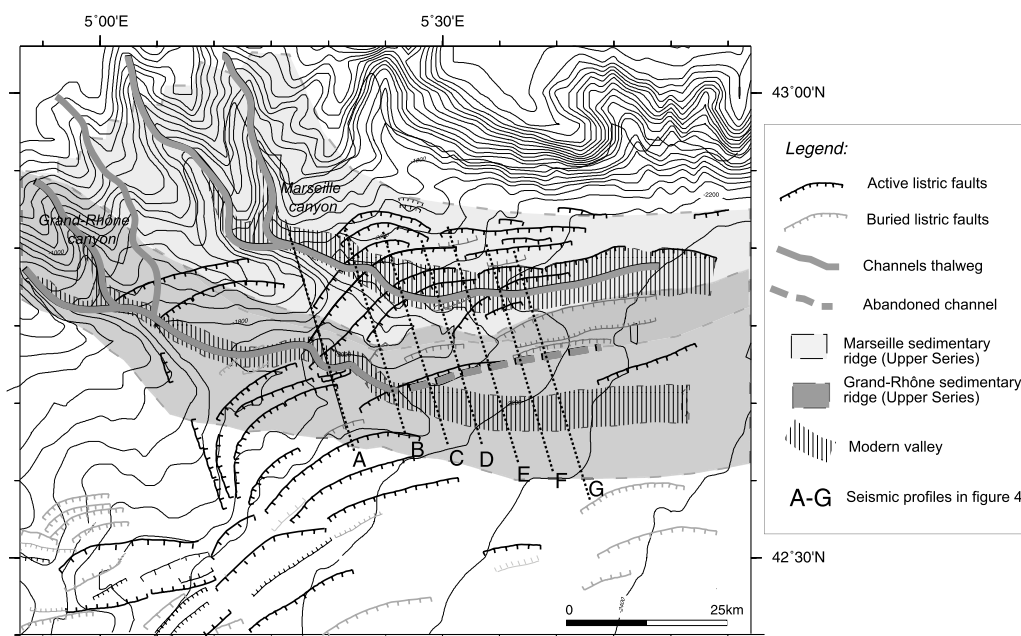


Fig. 3. Salt-structural and sedimentary map of the South Provençal margin, Gulf of Lions. In the area, sedimentation and salt tectonics are intimately related processes responsible for the configuration of the Marseilles and Grand-Rhone Quaternary deep depositional systems. The Marseilles and Grand-Rhone canyons/channels are inflected to the east under the effect of salt-induced bathymetric relief (listric fault scarps). The respective depocenters (the Marseilles and Grand-Rhone sedimentary ridges) are equally east–west disposed.

Fig. 3. Carte des structures sédimentaires et des failles générées par la tectonique salifère au large de la marge Sud-Provençale du golfe du Lion. Dans ce domaine, les processus sédimentaires et le fonctionnement des structures majeures en relation avec la tectonique salifère sont à l'origine de la configuration des systèmes sédimentaires profonds quaternaires de Marseille et du Grand Rhône. Les canyons/vallées de Marseille et du Grand Rhône sont déviés vers l'est sous le contrôle des escarpements de failles listriques. Les dépocenters des rides sédimentaires de Marseille et du Grand Rhône montrent clairement une orientation est–ouest.

3. Salt–sediment interaction in the Marseilles and Grand-Rhone sedimentary ridges

Submarine valleys that cross the South Provençal subsystem strike in general east–west, consistently with the listric faults. Both the Marseilles and Grand-Rhone valleys underwent an abrupt deflection to the east, dictated by the near-floor effect of salt deformation (Fig. 3). Proximally, valleys were captured either by faulted-blocks movement or graben structures, while distally they were systematically confined along fault scarps (Fig. 3). Because growth faults are spatially configured in successive relays, confined palaeo-thalwegs jumped from a structural compartment to the next, forming a broad zigzag pattern, with a resultant east–west trend (Figs. 3 and 4). Locally, however, crustal structures have impacted the orientation

of valleys, such as observed at the confluence of the Marseilles and the Planier canyons (Fig. 3). Here, the emerging valley turns to the left under the influence of deep Oligo-Aquitania extensional faults running parallel to the margin, related to the basin-rifting phase (Figs. 3 and 4a).

As well as that, gravity-induced extension is directly responsible, not only for the orientation of submarine valleys, but also for the east–west configuration of the sedimentary ridge depocenters. Moreover, the salt-structural framework equally influenced the morphological pattern of overbanking deposits. On bathymetric and morphological profiles, both the Marseilles and Grand-Rhone ridges seem asymmetric, leading authors to assume that overflow deposition was biased to the canyons' right bank due to the Coriolis force [1,4]. But, in reality, from a detailed correla-

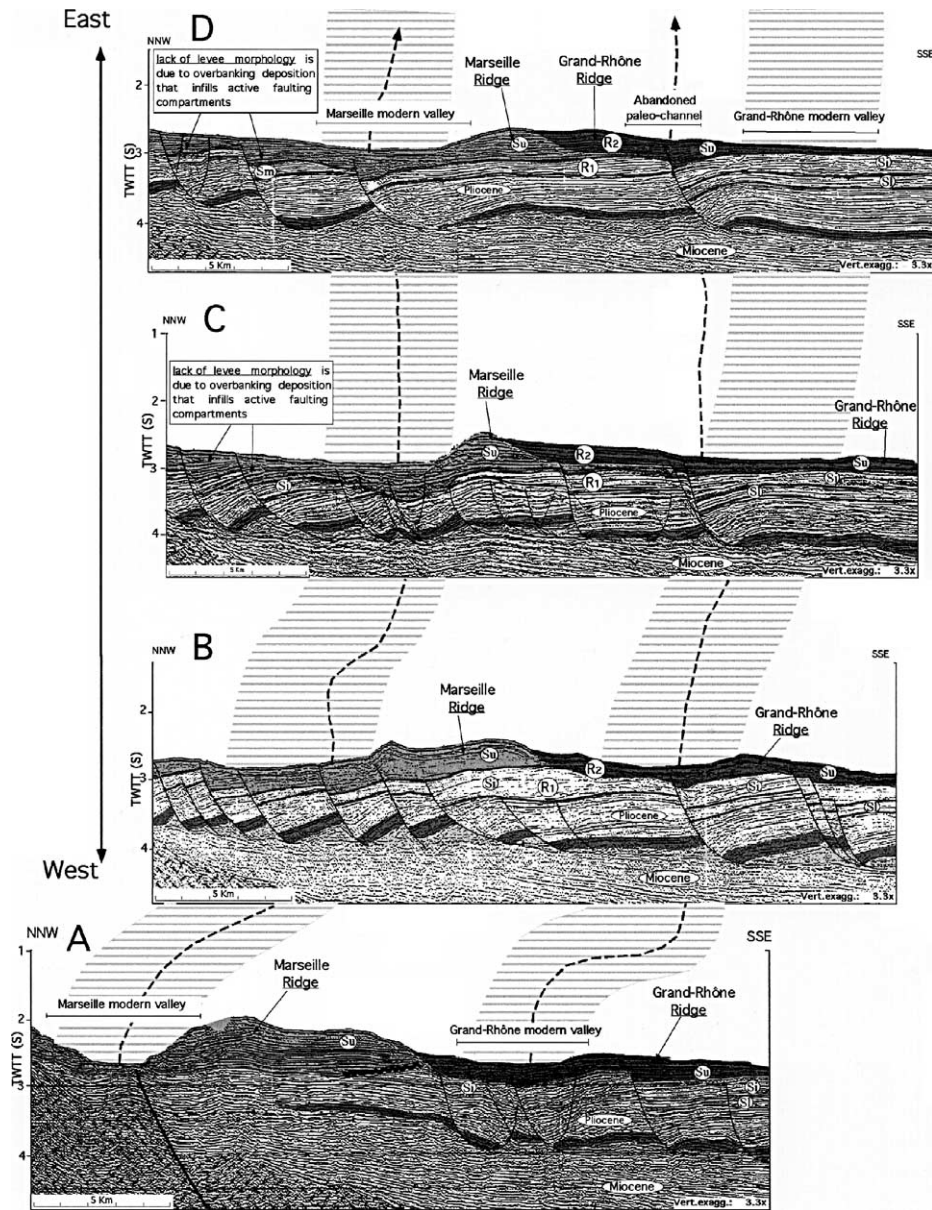


Fig. 4. Set of interpreted dip-oriented seismic profiles (CEPM multichannel seismic) across the Marseilles and Grand-Rhône sedimentary ridges, South Provençal margin. Sections show salt-structural conditioning of both the Marseilles and Grand-Rhône canyons, confined along successively relayed Plio-Quaternary listric faults. See Fig. 3 for location.

Fig. 4. Ensemble de profils sismiques (sismique multitrace CEPM) transverses à la ride de Marseille et celle du Grand Rhône, marge Sud-Provençale. Les coupes montrent le contrôle structural sur les canyons de Marseille et du Grand Rhône, dont les vallées sont confinées le long des failles listriques en relais. Voir la Fig. 3 pour la localisation.

tion of acoustic units and reflectors of the sedimentary Upper Series (Upper Quaternary), we observed that overflow deposits did occur on both sides of the Mar-

seilles and Grand-Rhône valleys. Along the Marseilles valley, ridge development is indeed only observed on the canyon right flank. However, this asymmetry is not

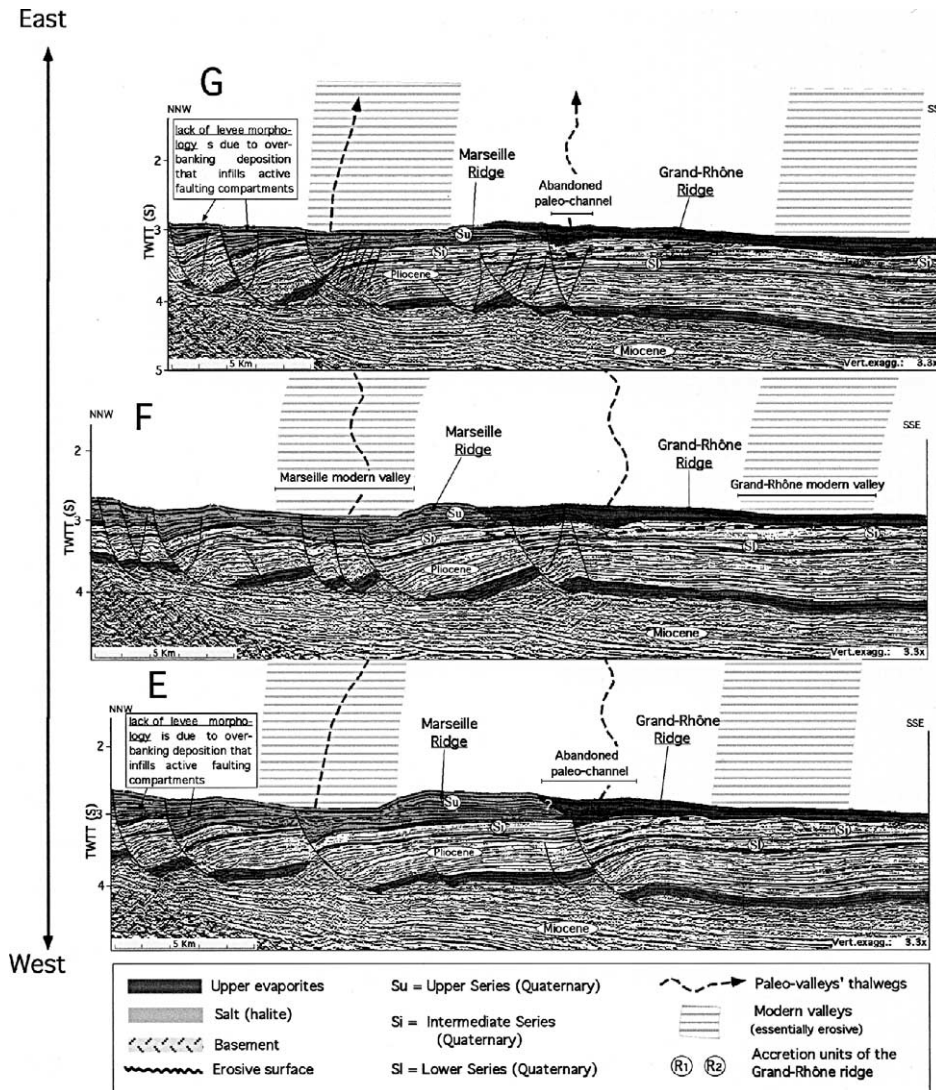


Fig. 4. (continued).

hydrodynamically dependent, but salt-tectonically imposed. The Marseilles valley left flank is bordered by closely spaced active growth faults, where associated block rotation contributed to create space accommodation for overbanking deposits. Under these conditions, leftside overflow sediments were structurally organized as expanded stratigraphic wedges, recognized by landward diverging reflectors in seismic sections in Fig. 4. As a consequence, a typical external levee morphology could not develop (Figs. 4B–G). On the other hand, overbanking deposition is neatly organized as

a sedimentary ridge along the Marseilles valley right flank, favored by larger and more stable block compartments. As for the Grand-Rhone ridge, morphological asymmetry is not omnipresent. Proximally, the left levee construction was inhibited by a local buttress provided by the prominent Marseilles sedimentary ridge, up to about 600 m high. Accretion then occurred preferentially on the valley right flank (Figs. 4A and B). Eastwards, as the Marseilles ridge topography progressively degraded, overflow sediments were able to deposit on both flanks of the Grand-Rhone valley.

Overflow deposition on the valley right flank built up the so-called Grand-Rhone ridge. At the same time, left flank levee deposition gradually overlapped the Marseilles ridge and both sedimentary units merged as one single morphological feature (Fig. 4B–G).

4. Conclusions

The structural confinement of both the Marseilles and the Grand-Rhone submarine valleys is a striking example of how salt tectonics can condition the arrangement of sediment transport systems and their associated depocenters.

Both the Grand-Rhone and Marseilles submarine valleys strike east–west, i.e. parallel to listric fault trends. The near-floor effect of salt-related deformation impacted sea-floor morphology of the Provencal continental rise by creating bathymetric reliefs that captured and guided canyon directions. In spite of the local character of such a tectonic control, it also defined the orientation of associated deep sedimentary systems (sedimentary ridges). Here, the salt-tectonic control over the configuration of the deep depositional system is clearly expressed in the present-day seafloor morphology by sedimentary ridges disposed parallel to tectonic lineaments.

The asymmetric morphology of the Marseilles and Grand-Rhone ridges is also salt-tectonically conditioned. Active listric faulting generated space accommodation for overflow deposits, which prevented the development of typical levee morphology, notably along the Marseilles left flank. Consequently, we do not invoke the Coriolis force as a fundamental mechanism for ultimate ridge asymmetry.

Acknowledgements

We are specially grateful to the CEPM – ‘Comité d’études pétrolières marines’ (Total-Elf, IFP – ‘Institut français du pétrole’) for kindly providing most of the multichannel seismic profiles used in this paper. This work also depended on bathymetric data released by IFREMER-Brest, France. CNPq-Brazilian National Agency of Science and Technology funded the first author. We would like to thank GDRMarges (*Groupe*

d’étude et de recherche des marges), the Laboratory of Tectonics (‘Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris-6’ – URM 7072) where the first author conducted his doctoral research, and the Marine Geology Research Group, URM 17 – ‘Université de Lille-1’, for financial support for scientific meetings.

References

- [1] G. Bellaiche, V. Coutellier, L. Droz, Detailed morphology, sedimentary structure and evolution of the continental margin of the Western Provencal Basin (south of France) since Late Miocene, *Mar. Geol.* 89 (1989) 259–268.
- [2] P.R. Cobbold, P. Szatimari, Radial gravitational gliding on passive margins, *Tectonophysics* 188 (1991) 249–289.
- [3] P.R. Cobbold, P. Szatimari, L.S. Demercian, D. Coelho, E.P. Rossello, Seismic and experimental evidence for thin-skinned horizontal shortening by convergent radial gliding on evaporites, deep-water Santos Basin, Brazil, in: M.P.A. Jackson, D.G. Roberts, S. Sneldon (Eds.), *Salt Tectonics: A Global Perspective*, AAPG Memoir 65 (1995) 305–321.
- [4] V. Coutellier, Mise en évidence et rôle des mouvements gravitaires dans l’évolution de la marge continentale : exemple des marges du golfe du Lion et de la Provence occidentale, thèse de 3^e cycle, université Pierre-et-Marie-Curie, Paris-6, 1985, 189 p.
- [5] E.A. Diegel, J.F. Karlo, D.C. Schuster, R.C. Shoup, P.R. Tauvers, Cenozoic structural evolution and tectono-stratigraphic framework of the Northern Coast Continental Margin, in: M.P.A. Jackson, D.G. Roberts, S. Sneldon (Eds.), *Salt Tectonics: A Global Perspective*, AAPG Memoir 65 (1995) 109–151.
- [6] A.T. dos Reis, La tectonique salifère et son influence sur l’architecture sédimentaire quaternaire de la marge du golfe du Lion – Méditerranée occidentale, thèse, université Pierre-et-Marie-Curie, Paris-6, 2001, 372 p.
- [7] V. Gaullier, Diapirisme salifère et dynamique sédimentaire dans le Bassin liguro-provençal, thèse, université de Rennes, 1993, 327 p.
- [8] F.C. Peel, C.J. Travis, J.R. Hossack, Genetic structural provinces and salt tectonics on the Cenozoic offshore Gulf of Mexico: a preliminary analysis, in: M.P.A. Jackson, D.G. Roberts, S. Sneldon (Eds.), *Salt Tectonics: A Global Perspective*, AAPG Memoir 65 (1995) 153–176.
- [9] D.C. Schuster, Deformation of allochthonous salt and evolution of related salt-structural systems, Eastern Louisiana Gulf Coast, in: M.P.A. Jackson, D.G. Roberts, S. Sneldon (Eds.), *Salt Tectonics: A Global Perspective*, AAPG Memoir 65 (1995) 177–198.
- [10] W.H.F. Smith, D.T. Sandwell, Seafloor topography from satellite altimetry and ship soundings, *Science* 10 (1997) 1957–1962.
- [11] B. Vendeville, P.R. Cobbold, Glissements gravitaires synsédimentaires et failles normales listriques: modèles expérimentaux, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 305 (1987) 1313–1319.