



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 901–907



Géosciences de surface (Géomorphologie)

Eustatisme, érosion et isostasie flexurale : modélisation numérique appliquée au Rhône messinien

Julien Gargani

Laboratoire de sédimentologie–CGES, École nationale supérieure des mines de Paris, 35, rue Saint-Honoré, 77300 Fontainebleau, France

Reçu le 11 mars 2003 ; accepté le 2 mars 2004

Disponible sur Internet le 18 mai 2004

Présenté par Xavier le Pichon

Résumé

La réponse isostatique du Rhône messinien à l'érosion et à la disparition de la charge hydrique de la mer Méditerranée est quantifiée. Les conséquences de la réponse isostatique sur la dynamique fluviale sont analysées sur la base du profil longitudinal du Rhône messinien. **Pour citer cet article : J. Gargani, C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

The isostatic response to erosion and Mediterranean Sea unloading of the Messinian Rhone has been quantified. The consequences of the isostatic rebound on fluvial dynamic have been analysed considering the Messinian Rhone profile. **To cite this article: J. Gargani, C. R. Geoscience 336 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : érosion ; isostasie flexurale ; déformation ; profil longitudinal ; Rhône messinien ; France

Keywords: erosion; flexural isostasy; deformation; longitudinal profile; Messinian Rhone; France

Abridged English version

1. Introduction

During the Messinian salinity crisis (5.8–5.35 Myr), a dramatic lowering of the Mediterranean Sea happened, estimated around 1500–2500 m [4]. It left deep incision profiles in the main rivers flowing into the Mediterranean Sea.

In the long-term scale, as large masses are transported, incised surfaces can be deformed by flexural isostasy. We study the mechanical consequences of long term erosion and sea unloading on the Rhone valley (Fig. 1) and on the river profile evolution.

2. The post-Messinian deformation

To analyse the effect of isostasy on the Rhone River profile, we synthesised the post-Messinian vertical deformation on the Rhone profile. We reconstructed the present Messinian Rhone longitudinal profile without

Adresse e-mail : julien.gargani@ensmp.fr (J. Gargani).

post-Messinian deformation (Fig. 2). In a second time, we also took into account the post-Messinian subsidence downstream.

3. Consequences of flexural isostasy

The vertical deformation resulting from isostasy is more important in the South, where the incision is deeper, than in the North. We quantified the mechanic deformations of the Rhone (Figs. 3–5). These effects must be cumulated with the flexural isostasy due to sea unloading (Fig. 6). Two-dimensional flexure models indicate that the regionally compensated crustal upwarping from removal of the seawater load would lead to a Messinian geomorphology with an uplifted Mediterranean Basin and shoreline bulges along its northwestern and southeastern coasts [20]. We have modelled the Mediterranean Sea unloading by the disappearance of 1500 m of water, on a width of 700 km and a depth 2.5 km. We obtained an uplift of more than 500 m into the Mediterranean Basin and between 100 and 300 m on the coast due to flexural isostasy (Fig. 6). The amplitude of the uplift depends on the flexural rigidity, D . The flexural rigidity from the sea unloading also influences the amplitude of the uplift at the north of the Mediterranean Basin. The influence of sea unloading is between 30 ($D = 10^{20}$ N m) and 180 km ($D = 10^{24}$ N m) inland from the coastline (Fig. 6).

The Pliocene filling cancelled in part this uplift almost on all the Rhone profile. But the consequences of the feedback effect between erosion, sea-level lowering and flexural isostasy can be observed on the Messinian Rhone longitudinal profile (Fig. 7).

The present break slope of the Messinian Rhone River can be explained, in part, by the flexural isostasy. However, because of the large amplitude of the erosion, calculation of the flexural isostasy showed that it has to be taken into account in the downstream reach of the valley to understand the complex evolution of the Rhone Valley. This basic approach illustrates the constraints on river profile and valley deformation in response to valley incision and sea unloading.

1. Introduction

Lorsque de grandes quantités de matière sont enlevées, des déformations mécaniques se produisent.

Lors de la crise de salinité messinienne [22], un abaissement du niveau de la mer Méditerranée de 1500–2500 m s'est produit [4,23]. Ceci a provoqué de profondes incisions dans les principaux fleuves se jetant dans la Méditerranée [2–4].

La relation entre érosion et surrection a été suggérée par Schumm [25] et étudiée par plusieurs auteurs [12,19,27]. Les conséquences importantes de l'incision des vallées sur la surrection de l'Himalaya ont été mises en évidence [19]. Dans le cas de l'érosion messinienne du Rhône, la dimension importante du canyon, mais aussi la disparition de la charge hydrique nécessitent de prendre en compte l'isostasie flexurale pour une meilleure compréhension de la genèse du canyon.

2. Les déformations post-messinienne

Pour analyser les conséquences de la compensation isostatique sur la vallée messinienne du Rhône (Fig. 1), nous avons synthétisé les déformations post-messinienne le long de la vallée du Rhône sur la

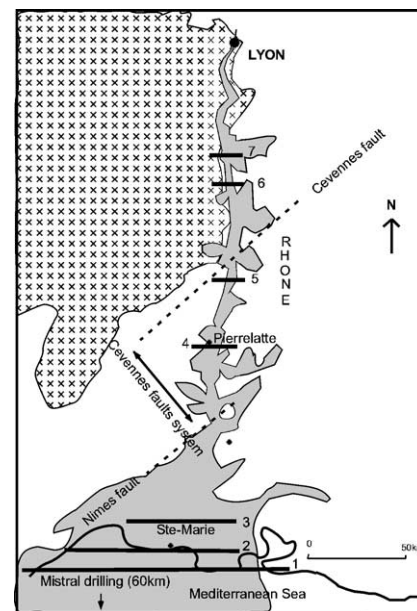


Fig. 1. Dépôts pliocènes dans la vallée messinienne du Rhône (d'après [1]). En gris, les dépôts pliocènes. Le socle hercynien est représenté par des croix.

Fig. 1. Pliocene deposits in the Messinian Rhone valley, France (from [1]). Grey: Pliocene filling. Crosses: Hercynian basement. Location of the valley sections.

base du travail de Mandier [15]. Une surrection post-messinienne d'environ 225 m dans la partie amont de la vallée du Rhône a été estimée par Mandier [15]. Cependant, à Saint-Désirat, Clauzon et al. [6] ont estimé une surrection plus faible comprise entre 80 et 130 m. Plus à l'aval, dans la région comprise entre la faille des Cévennes et la faille de Nîmes, la surrection post-messinienne aurait été d'environ 145 m [15]. Elle est estimée à 190 m par Clauzon et Mocochain in [3]. Enfin, au niveau de la faille de Nîmes, une surrection de 40 m au maximum s'est produite [24]. Pour la partie aval du Rhône, aucune quantification précise de la déformation n'existe. Clauzon [5] écarte l'éventualité d'un rejeu tectonique post-messinien. Les failles n'ont pas été actives depuis le Pliocène inférieur dans le golfe du Lion [16]. Cependant, la subsidence du golfe du Lion est admise [13,26]. Elle serait en partie due à la charge sédimentaire [14].

Les déformations verticales sont schématisées sur la Fig. 2. Le profil longitudinal du Rhône messinien actuel [8], d'où ont été retirées les déformations verticales post-messiennes (sauf la subsidence due au chargement plio-quadernaire), y est également re-

présenté. On a ainsi obtenu le profil messinien du Rhône tel qu'il aurait été sans les déformations post-messiennes (Fig. 2), subsidence aval non comprise. Aucune de ces informations n'est inédite [5,7–9].

3. Principe du modèle

Le modèle qui permet de calculer la compensation isostatique est désormais classique. Il consiste à simuler la réponse d'une plaque élastique, initialement à l'équilibre, reposant sur un fluide visqueux par suite d'un départ de matière [12,17,21,27,28].

La déformation mécanique de la lithosphère due à la compensation isostatique dépend, notamment, de la rigidité flexurale de la croûte :

$$D(x, 0) = \frac{E T_e^3}{12 (1 - \nu^2)}$$

avec E le module d'Young, ν le coefficient de Poisson et T_e l'épaisseur élastique. La rigidité flexurale D généralement utilisée est comprise entre 10^{20} et 10^{24} N m [10,11,18,21].

Pour traiter ce problème tridimensionnel avec un modèle bidimensionnel, il faut tenir compte de la géométrie des structures étudiées. En tenant compte de la symétrie du problème, on peut travailler sur des sections 2D perpendiculaires au cours du Rhône.

4. Résultats

4.1. Conséquences de l'incision des vallées

Les conséquences de la compensation isostatique provoquées par l'incision messinienne sont les suivantes.

- Dans la partie aval (Sections 1, 2 et 3) : une surrection de 50 (si $D = 10^{24}$ N m) à 500 m ($D = 10^{20}$ N m) dans le centre de la vallée suivant la valeur de la rigidité flexurale D ; une surrection de 50 à 250 m sur les flancs de la vallée pour la section de vallée 1 (Fig. 3) ; une surrection de 10 à 120 m sur les flancs de la vallée pour la section de vallée 2 ; pour la section de vallée 3, les déformations verticales sont comprises entre 30 et 200 m dans la vallée et entre 30 et 150 m sur les flancs de la vallée.

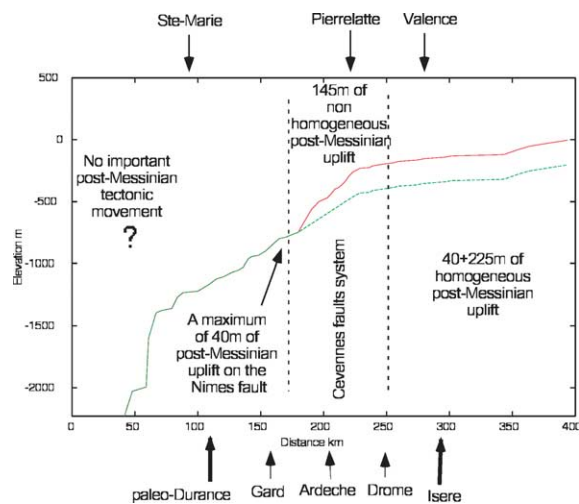


Fig. 2. Profil longitudinal du Rhône messinien avant (au-dessus) [8] et après (en dessous) avoir tenu compte des déformations post-messiennes. Les flèches indiquent la localisation des paléo-affluents.

Fig. 2. Messinian Rhone profile before (upper one) [8] and after (lower one), taking into account post-Messinian deformations. Arrows indicate probable locations of the palaeo-tributaries (bold: important flow).

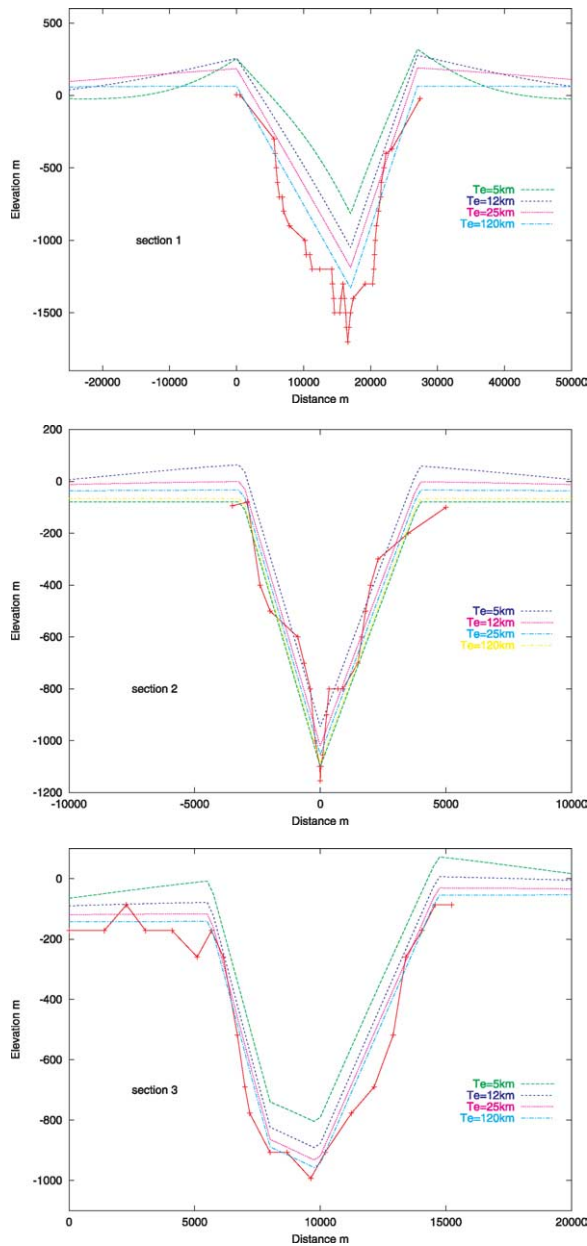


Fig. 3. Effet de l'isostasie : offshore (Sections 1 et 2), Camargue (Section 3).

Fig. 3. Effect of isostasy on the Rhone Valley: Offshore (Sections 1 and 2), Camargue (Section 3).

- Dans la partie centrale du Rhône (Section 4) : une surrection de 20 ($D = 10^{24}$ N m) à 170 m ($D = 10^{20}$ N m) dans la région de Pierrelatte (Fig. 4).

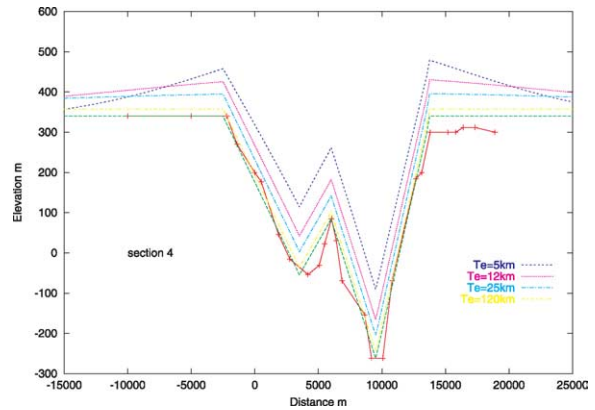


Fig. 4. Effet de l'isostasie vers Pierrelatte (Section 4). Module d'Young $E = 10$ GPa, coefficient de Poisson $\nu = 0,25$, $\rho_{\text{asthénosphère}} = 3179 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho_{\text{manteau}} = 3330 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho_{\text{sédiment}} = 2400 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho_c = 2800 \text{ kg m}^{-3}$.

Fig. 4. Effect of isostasy on the Rhone valley. Pierrelatte (Section 4). Young modulus $E = 10$ GPa, Poisson coefficient $\nu = 0,25$, $\rho_{\text{asthenosphere}} = 3179 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho_{\text{mantel}} = 3330 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho_{\text{sediment}} = 2400 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho_c = 2800 \text{ kg m}^{-3}$.

- Dans la partie amont (Sections 5, 6 et 7) : une surrection inférieure à 25 m, d'après les calculs effectués sur la Section 5 (Fig. 5). Pour les Sections 6, 7, aucun effet provoqué par la compensation isostatique à la suite de l'incision messinienne n'est mis en évidence par le modèle.

4.2. Conséquences de l'abaissement de la Méditerranée

Il faut également prendre en compte les conséquences de l'abaissement de la mer Méditerranée. La compensation isostatique de la lithosphère due à la disparition de la charge en eau conduit à des bouleversements géomorphologiques d'importance. Le modèle prévoit notamment une surrection du Bassin méditerranéen et un bombement au niveau de la ligne de côte [20]. Nous avons modélisé une diminution du chargement en eau de la Méditerranée de 1500 m sur le tronçon séparant la marge africaine de la marge européenne (~ 700 km de long, $\sim 2,5$ km de profondeur). On obtient une surrection de plus de 500 m du Bassin méditerranéen, quelle que soit la rigidité flexurale, et entre 30 et 300 m théoriques de bombement sur le continent, dus à la flexure au niveau de la rupture de pente la plus en aval (\sim Sainte-Marie). Sur la côte, la

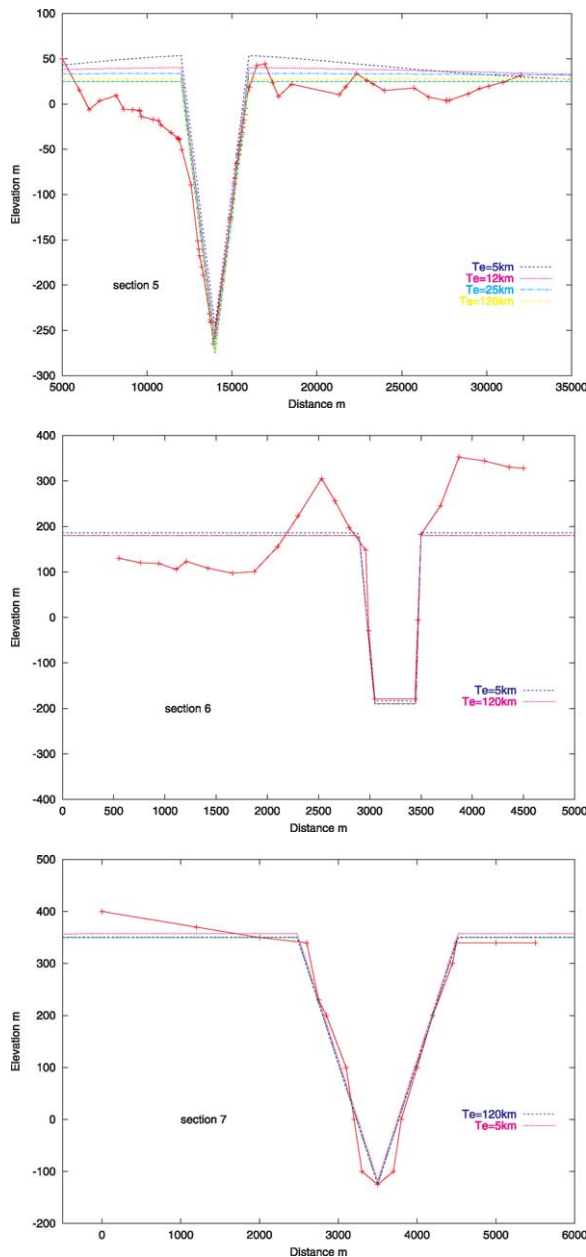


Fig. 5. Effet de l'isostasie vers Montélimar (Section 5), vers Valence (Section 6) et à Saint-Désirat (Section 7).

Fig. 5. Effect of isostasy on the Rhone valley. Near Montélimar (Section 5), near Valence (Section 6) and in Saint-Désirat (Section 7).

valeur de la déformation dépend de la valeur de la rigidité flexurale (Fig. 6). La valeur de la déforma-

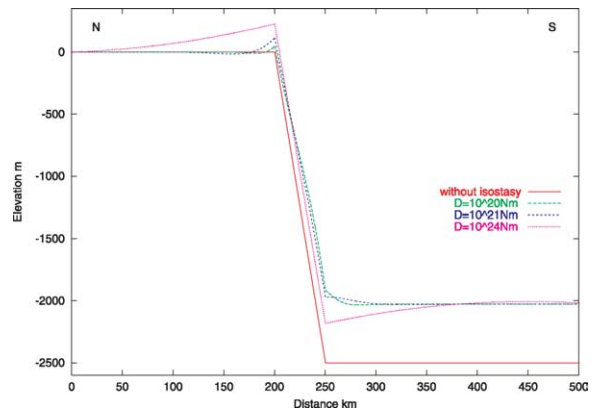


Fig. 6. Déformation résultant de la compensation isostatique après qu'un abaissement de la Méditerranée de 1500 m eut lieu durant la crise de salinité messinienne.

Fig. 6. Deformation resulting from flexural isostasy after the Mediterranean Sea unloading during the Messinian salinity crisis.

tion diminue avec l'éloignement de la mer Méditerranée.

L'amplitude de la longueur d'onde de la déformation dépend elle aussi de la rigidité flexurale (Fig. 6). La longueur d'onde de la déformation est entre 30 ($D = 10^{20}$ N m) et 180 km ($D = 10^{24}$ N m).

5. Discussion et conclusion

Par la quantification des déformations provoquées par l'érosion et la chute du niveau marin sur le profil longitudinal du Rhône, on peut faire les observations suivantes.

- Les déformations messiniennes sont plus importantes en aval, là où l'incision a été la plus profonde. L'amplitude de la déformation dépend de la rigidité flexurale D .
- Si on additionne les effets de la compensation isostatique dus à l'incision, à ceux dus à la disparition de la charge en eau de la Méditerranée, on obtient, dans la partie *offshore*, entre 350 et 1000 m de surélévation provoquée par l'isostasie (Fig. 7). Dans la région de Sainte-Marie, il y a eu entre 30 et 400 m de surélévation. Dans la région de Pierrelatte, il y a eu entre 20 et 180 m de surélévation. Ce dernier résultat est proche de celui de Clauzon et Mocochain [3], qui évaluent cet impact à 190 m. En revanche, dans la partie la plus en amont, ni

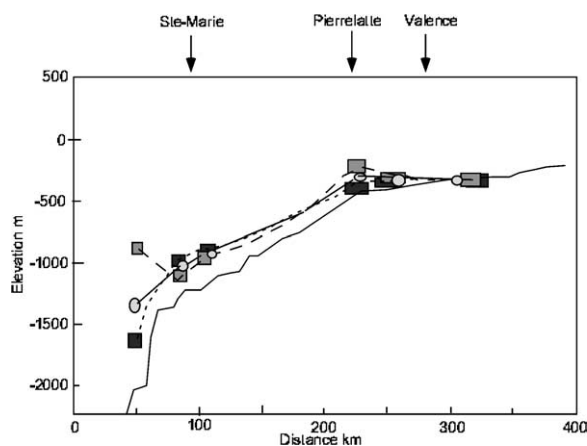


Fig. 7. Déformation résultant de la compensation isostatique après qu'un abaissement de la Méditerranée de 1500 m ainsi que l'incision de la vallée du Rhône au cours de la crise de salinité messinienne eurent lieu. Rectangle noir lorsque $D = 10^{24}$ N m. Cercle gris lorsque $D = 10^{22}$ N m. Rectangle gris lorsque $D = 10^{20}$ N m.

Fig. 7. Deformation resulting from flexural isostasy after the Mediterranean sea unloading of 1500 m and valley incision during the Messinian salinity crisis. Black box for $D = 10^{24}$ N m. Grey circle for $D = 10^{22}$ N m. Grey box for $D = 10^{20}$ N m.

l'abaissement du niveau de la mer, ni l'érosion n'ont provoqué de déformation quantifiable. Or, les indications de terrain évaluent la part du soulèvement tectonique durant la crise messinienne à 80 m dans la région de Saint-Désirat [6]. La déformation contemporaine à la crise messinienne dans la région de Saint-Désirat pourrait s'expliquer par l'existence d'une tectonique non liée au rebond isostatique.

- Les effets de la crise de salinité messinienne sur le réseau hydrographique dépendent à la fois du débit des fleuves et de la rigidité flexurale de la lithosphère. Les fleuves les plus importants ont certainement incisé le bombement qui s'est produit en bordure du Bassin méditerranéen, alors que les cours d'eau plus petits ont probablement été réorientés [20].
- Le remplissage pliocène a annihilé ou fortement réduit presque partout le rebond isostatique messinien. Cependant, un effet du rebond isostatique persiste dans la région de Pierrelatte. Il ne subsiste au maximum que 300 m de la surrection messinienne pour la Section 1.
- Les effets du couplage entre l'isostasie et l'érosion sont perceptibles dans le profil actuel du Rhône

messinien, dans la partie à l'aval de Pierrelatte. Si, aux effets provoqués par l'isostasie messinienne, schématisés sur la Fig. 7, on rajoute les effets de la subsidence plio-quaternaire (entre 50 et 300 m pour la Section 1, entre 10 et 100 m pour la Section 2, entre 30 et 150 m pour la Section 3), ainsi que ceux provoqués par le *rifting* [13,14], on obtient le profil tel qu'il devait se présenter avant le remplissage pliocène et la remise en eau complète de la Méditerranée. De plus, en additionnant l'effet du matériel érodé sur l'ensemble du réseau hydrographique limitrophe du Rhône, on augmenterait la surrection provoquée par l'isostasie. La rupture de pente des environs de Pierrelatte était donc bien moins prononcée, même s'il ne s'agissait pas nécessairement d'un profil à l'équilibre.

Remerciements

L'auteur remercie I. Cojan, O. Stab et J. Colson pour leurs conseils.

Références

- [1] R. Ballesio, Étude stratigraphique du Pliocène rhodanien, Doc. Lab. Géol. Fac. Sci. Lyon 53 (1972) 333.
- [2] P.M. Barber, Messinian subaerial erosion of the Proto-Nile Delta, *Mar. Geol.* 44 (1981) 253–272.
- [3] Clauzon et Mocochain in D. Besson, et al., Le Miocène du bassin d'avant-pays rhodano-provençal, in: *Livret guide d'excursion du congrès STRATI 2002*, Lyon, 2002, 162 p. (à paraître in Publications ASF).
- [4] I.S. Chumakov, Geological history of the Mediterranean at the end of the Miocene – the beginning of the Pliocene according to new data, *Init. Rep. D.S.D.P., Washington, DC* 13 (2) (1973) 1241–1242.
- [5] G. Clauzon, Le canyon messinien du Rhône : une preuve décisive du *dessicated deep-basin model* (Hsü, Cita et Ryan, 1973), *Bull. Soc. géol. France* 24 (3) (1982) 597–610.
- [6] G. Clauzon, et al., Genèse et évolution du piémont néogène subalpin du Bas-Dauphiné, *Trav. URA 903* (19) (1990) 78.
- [7] G. Clauzon, J.-L. Rubino, B. Savoye, Marine Pliocene Gilbert-type fan deltas along the French Mediterranean coast: a typical infill feature of preexisting subaerial Messinian canyons, in: *5^e Congrès français de sédimentologie, Field trip book 23*, Publ. Association des sédimentologues français, 1995.
- [8] J. Colson, O. Stab, B. Beaudoin, Modélisation d'une incision future de type messinien du système Rhône-Cèze. Rapport ANDRA D RP 0ARM 97-016/A, 2000.

- [9] P. Guennoc, C. Gorini, A. Mauffret, La surface d'érosion messinienne dans le golfe du Lion, *Géol. France* 3 (2000) 67–97.
- [10] R. Hassani, J. Chery, Anelasticity explains topography associated with basin and range normal faulting, *Geology* 24 (12) (1996) 1095–1098.
- [11] G. King, M. Ellis, The origin of large local uplift in extensional regions, *Nature* 348 (1990) 689–693.
- [12] H. Kooi, C. Beaumont, Escarpment evolution on high-elevation rifted margins: insights derived from a surface processes model that combines diffusion, advection, and reaction, *J. Geophys. Res.* B 99 (6) (1994) 12191–12209.
- [13] H. Kooi, S. Cloethingh, J. Burrus, Lithospheric necking and regional isostasy at extensional basins 1. Subsidence and gravity modeling with an application to the Gulf of Lion margin (SE France), *J. Geophys. Res.* B 97 (12) (1992) 17553–17571.
- [14] J. Lofi, M. Rabineau, C. Gorini, S. Berne, G. Clauzon, P. De Clarens, A. Tadeu Dos Reis, G.S. Moutain, W.B.F. Ryan, M. Steckler, C. Fouchet, Plio-Quaternary prograding clinoform wedges of the western Gulf of Lion continental margin (NW Mediterranean) after the Messinian Salinity crisis, *Mar. Geol.* 198 (2003) 289–317.
- [15] P. Mandier, Le relief de la moyenne vallée du Rhône au Tertiaire et au Quaternaire, in: *Doc. BRGM*, vol. 151, 1988, 654 p.
- [16] A. Mauffret, B. Durand de Grossouvre, A. Tadeu Dos Reis, C. Gorini, A. Nercessian, Structural geometry in the Pyrenees and western Gulf of Lion (Western Mediterranean), *J. Struct. Geol.* 23 (2001) 1701–1726.
- [17] J.-C. Maurin, K. Renaud, Isostasie flexurale et érosion différentielle : modélisation numérique appliquée au seuil du Poitou, *C. R. Geoscience* 334 (2002) 1149–1155.
- [18] J.G. Mazek, B.L. Isacks, E.J. Fieldind, Rift flank uplift in Tibet: evidence for viscous lower crust, *Tectonics* 13 (2) (1994) 659–667.
- [19] D.R. Montgomery, Valley incision and the uplift of mountain peaks, *J. Geophys. Res.* B 99 (7) (1994) 13913–13921.
- [20] S.E. Norman, C.G. Chase, Uplift of the shores of the Western Mediterranean due to Messinian desiccation and flexural isostasy, *Nature* 322 (1986) 450–451.
- [21] F.J. Pazzaglia, T.W. Gardner, Late Cenozoic flexural deformation of the middle US Atlantic passive margin, *J. Geophys. Res.* B 99 (6) (1994) 12143–12157.
- [22] W.B.F. Ryan, Quantitative evaluation of the depth of the Western Mediterranean before, during and after the Late Miocene salinity crisis, *Sedimentology* 23 (1976) 791–813.
- [23] W.B.F. Ryan, K.J. Hsü, et al., *Init. Repts DSDP*, Washington, DC, vol. XIII, 1, 2, 1973, 1447 p.
- [24] A. Schlupp, G. Clauzon, J.-P. Avouac, Mouvement post-messinien sur la faille de Nîmes : implications pour la sismotectonique de la Provence, *Bull. Soc. géol. France* 172 (6) (2001) 697–711.
- [25] S.A. Schumm, The disparity between present rates of denudation and orogeny, *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 454-H (1963) 51–63.
- [26] M. Tesson, G. Allen, Contrôle tectonique et eustatique haute-fréquence de l'architecture et de la stratigraphie de dépôts de plate-forme péricratonique. Exemple du golfe du Lion (Méditerranée, France) et des dépôts quaternaires, *C. R. Geoscience* 320 (1995) 39–46.
- [27] G.E. Tucker, Slingerland R.L., Erosional dynamics, flexural isostasy, and long-lived escarpments: a numerical modelling study, *J. Geophys. Res.* B 99 (6) (1994) 12229–12243.
- [28] J.K. Weïssel, G.D. Karner, Flexural uplift of rift flanks due to mechanical unloading of the lithosphere during extension, *J. Geophys. Res.* 94 (1989) 13919–13950.