



Géosciences de surface (Géomorphologie)

# Un réseau fluvial d'âge Burdigalien terminal dans le Sud-Est de la France : remplissage, extension, âge, implications

David Besson <sup>a</sup>, Olivier Parize <sup>a,\*</sup>, Jean-Loup Rubino <sup>b</sup>, Jean-Pierre Aguilar <sup>c</sup>, Marie-Pierre Aubry <sup>d</sup>, Bernard Beaudoin <sup>a</sup>, William A. Berggren <sup>d,e</sup>, Georges Clauzon <sup>f</sup>, Philippe Crumeyrolle <sup>b</sup>, Yann Dexcoté <sup>a,1</sup>, Nicolas Fiet <sup>g</sup>, Silvia Iaccarino <sup>h</sup>, Gonzalo Jiménez-Moreno <sup>i,j</sup>, Cécile Laporte-Galaa <sup>b</sup>, Jacques Michaux <sup>c,k</sup>, Katharina von Salis <sup>l</sup>, Jean-Pierre Suc <sup>k</sup>, Jean-Yves Reynaud <sup>m</sup>, Roland Wernli <sup>n</sup>

<sup>a</sup> *École des Mines de Paris, CGES–Sédimentologie, 35, rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau cedex, France*

<sup>b</sup> *Total, CST JF–TG/ISS, 64018 Pau cedex, France*

<sup>c</sup> *UMR 5554 CNRS, Institut des sciences de l'Évolution, Université Montpellier-2, CC 064, 34095 Montpellier cedex, France*

<sup>d</sup> *Department of Geological Sciences, Rutgers University, Piscataway, NJ 08854, USA*

<sup>e</sup> *Department of Geology and Geophysics, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02543, USA*

<sup>f</sup> *Cerege, UMR 6635, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France*

<sup>g</sup> *Laboratoire « Interactions et dynamique des environnements de surface » (IDES), UMR 8148 CNRS–Université Paris-Sud, Bât. 504, 91405 Orsay cedex, France*

<sup>h</sup> *Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Parma, Parco Area delle Scienze, 157A, 43100 Parma, Italie*

<sup>i</sup> *Laboratoire « Paléoenvironnements et paléobiosphère », UMR 5125, bât. Géode, 2, rue Raphaël-Dubois, Université Claude-Bernard–Lyon-1, 69622 Villeurbanne cedex, France*

<sup>j</sup> *Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Universidad de Granada, Avda. Fuente Nueva S/N, 18002 Granada, Espagne*

<sup>k</sup> *Laboratoire de paléontologie de l'École pratique des hautes études (EPHE), UMR 5554, Université Montpellier-2, CC 64, place Eugène-Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France*

<sup>l</sup> *Pf. 130, CH-7513 Silvaplana, Suisse*

<sup>m</sup> *Département « Histoire de la Terre », Muséum national d'histoire naturelle, 43, rue Buffon, 75005 Paris, France*

<sup>n</sup> *Département de géologie et paléontologie, Université de Genève, 13, rue des Maraîchers, CH-1211 Genève 4, Suisse*

Reçu le 10 février 2005 ; accepté après révision le 17 mai 2005

Disponible sur Internet le 28 juillet 2005

Présenté par Jean Dercourt

## Résumé

Dans le Sud-Est de la France, au front de la chaîne alpine, le bassin molassique miocène rhodano-provençal fait l'objet d'une analyse multidisciplinaire intégrée, combinant la reconnaissance des faciès, plusieurs catégories de repères stratigraphiques,

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [olivier.parize@ensmp.fr](mailto:olivier.parize@ensmp.fr) (O. Parize).

<sup>1</sup> Adresse actuelle : AMEC SPIE Oil & Gas Services, 10, av. de l'Entreprise, Pôle Edison, 95861 Cergy-Pontoise cedex, France.

l'identification des séquences de dépôt et leur cartographie par cortège sédimentaire. La répartition spatiale et temporelle des dépôts est principalement contrôlée par des réseaux de vallées incisées. L'incision fluviale la plus importante est celle qui est datée du Burdigalien terminal ; son remplissage marin transgressif est daté du Langhien. Cette nouvelle évolution physiographique au cours du Miocène permet de reconsidérer les corrélations stratigraphiques au sein de ce bassin. **Pour citer cet article : D. Besson et al., C. R. Geoscience 337 (2005).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

## Abstract

**Latest Burdigalian network of fluvial valleys in southeast France (western Alps): characteristics, geographic extent, age, implications.** An integrated study combining facies analysis, multiple group biostratigraphy, identification of depositional sequences and mapping has been conducted on the Miocene Molasse Basin of the external Alps (southeastern France). The filling of the basin is described as resulting from a succession of fluvial incisions subsequently filled during marine transgressions. The major incision is dated as Latest Burdigalian and the major transgression as Langhian. This revised interpretation of the Miocene physiographic evolution of the Molasse Basin implies a re-examination of previous stratigraphic correlations within the basin. **To cite this article: D. Besson et al., C. R. Geoscience 337 (2005).**

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés* : Alpes ; France ; Burdigalien ; Langhien ; Vallée incisée ; Hydrographie ; Géomorphologie

*Keywords*: Alps; Burdigalian; Langhian; Incised valley; Hydrography; Physiography

## Abridged English version

### 1. Introduction

The infilling of the Miocene Molasse Basin in the Rhone–Provence area (BMRP) has long been considered as having been formed by a succession of marine bioclastic molasse deposits ('Burdigalian'), sandy marls and sands ('Helvetian'), and 'Tortonian' molasse deposits [13,15,17], in a large Neogene transgressive–regressive cycle [6]. The basal part of this so-called 'Helvetian' is marked by a thick accumulation of poorly fossiliferous, shallow marine, sandy, grey marls that are reminiscent of the 'schlier' facies [13]. Part of these 'schlier' marls was considered Burdigalian in age and laterally equivalent to the bioclastic molasse deposits. Other 'schlier' marls were attributed to the Langhian.

The BMRP basin is divided in sub-basins along the Rhone and Durance rivers and their tributaries. Classically, the Early Miocene Sea transgressed from the south, flooding low zones before invading interfluvies and connecting the BMRP with peri-alpine East European basins at the end of the Burdigalian. In this view, the 'Burdigalian' molasse deposits crop out on the margins of sub-basins, whereas the 'schlier' facies occurs in their centre, a disposition that Gignoux questioned [17, p. 605].

At any rate, the geometric relationships between the infilling of the basin and its substratum were considered either conformable, or in a passive onlap, or in a diverging onlap. A fourth relationship (infilling of incised river valleys) has only recently been described [9,10,12,22,26,32].

### 2. "Schlier" marls: early filling of an incised valley

Our approach [9] combining facies analysis, multiple group biostratigraphy, depositional sequence identification and mapping has been applied to the Lower Miocene deposits. This has shown that they fill a complex network of incised valleys (Fig. 1a).

The Miocene stratigraphic succession (Fig. 2) is now considered to include a stratigraphic gap resulting from deep erosion. This has produced a younger network of incised valleys (= rias; Fig. 1b) which are now filled by sandy marls. The incision is about 40 m deep upstream (at Tanaron), about 300 m west of Avignon [27]. The infilling of the rias occurred diachronously until the end of the Serravalian.

### 3. Age of the incision and the infilling

The age of the erosional surface is constrained by various stratigraphic means (Fig. 2).

### 3.1. Foraminifera

Lower Miocene rocks are easily characterized [5, 10,22,24,32]. The marls at the base of sequence S3 have yielded *Praeorbulina* (Zone N8); those at the top of sequence S6 are assigned to Zones N14–15.

### 3.2. Ostracods

The ‘schlier’ marls and the molasse deposits have yielded different assemblages of ostracods, hampering confirmation that they are lateral correlative [9].

### 3.3. Calcareous nannoplankton

The marls of sequence S1 (Digne Basin) are assigned to Zone NN3–4 based on the occurrence of *Helicosphaera ampliaptera*. The marls of Sequence S3 (Forcalquier Basin) contain *Sphenolithus heteromorphus*, indicative of Zone NN5. The marls of sequence S6 (Cucuron and Valreas basins) belong to Zone NN6(sup) to NN8 [3].

### 3.4. Micromammals

The association of *Democricetodon* and *Megacricetodon*, with *M. lalai* in locality Châteauredon 1 characterises the upper part of Zone MN4 (16.6 to 16 Myr) [4,28].

### 3.5. Pollen

Above the erosion surface in the sections at Châteauredon and Bayanne there is an acme of *Avicennia*. By comparison with Spanish sections, this mangrove marker indicates the Miocene climatic optimum [25], dated here as Langhian.

### 3.6. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope stratigraphy

Isotopic data [9,10,16] are used in combination with a synthetic curve [14], as shown in Fig. 2.

### 3.7. K–Ar chronology

Glauconites have yielded ages too old (in excess of 1.5 to 2 Myr) to be useful.

### 3.8. Volcanic glass

The occurrence of volcanic shards in Sequence S2 (Beaulieu, ‘étang de Berre’) suggests a correlation with the well-known Beaulieu volcanism, dated at  $17.5 \pm 0.3$  Myr [2].

The Lower and Middle Miocene succession is now well calibrated (Fig. 2). The age of the major rela-

tive sea level drop (forced regression before fluvial incision) is in agreement with global sea level charts [1,19].

## 4. Implications

A major fluvial incision is now recognized at the very top of the Burdigalian succession (Figs. 1b and 2). A local incision of 300 m cannot be taken as indicative of the sea-level drop. Instead, it implies subsequent regional deformation the mode of which depends on the structural heritage. On the other hand, it appears that many old (and some recent) stratigraphic data should be reconsidered in the light of our results.

## 1. Introduction

Dans le Sud-Est de la France, au front de la chaîne alpine, le bassin molassique miocène rhodano-provençal (BMRP) est l’objet d’une analyse multidisciplinaire intégrée, visant à mieux comprendre l’organisation stratigraphique du remplissage d’un bassin syntectonique. L’actualisation du modèle stratigraphique selon les concepts de la stratigraphie séquentielle a permis de découper le remplissage miocène en 10 séquences (S–1, S0, S1 à S8), et de montrer l’importance des vallées incisées dans la répartition spatiale et temporelle des dépôts [9,10,12,22,26,32]. Ce compte-rendu présente les résultats du travail effectué sur la surface d’érosion fluviale de très grande ampleur que nous avons reconnue au passage entre le Miocène inférieur et le Miocène moyen et sur l’attribution stratigraphique des marnes plus ou moins sableuses de faciès «schlier» comblant cette morphologie.

### 1.1. Le faciès «schlier» dans le bassin molassique rhodano-provençal

Le remplissage du BMRP a longtemps été découpé en trois grandes formations lithologiques à signification stratigraphique, sur la base des éléments paléontologiques alors disponibles, lamellibranches et mammifères. Les dépôts marins sont représentés par les molasses principalement bioclastiques du «Burdigalien», les marnes sableuses et les sables de l’«Helvétien» et les molasses du «Tortonien» [13,15,

17]. Ils s'inscrivent dans le grand cycle transgressif-régressif néogène [6], qui se termine par la progradation d'un piedmont continental [11]. Le passage entre ce « Burdigalien » et cet « Helvétien » correspondrait à celui entre le « 1<sup>er</sup> étage méditerranéen » et le « 2<sup>e</sup> étage méditerranéen », tels que définis par Suess [33].

Dans le BMRP, la base de cet « Helvétien » est marquée par le développement d'un faciès assimilé au « schlier » [13,17], puissante accumulation de marnes sableuses, parfois laminées, gris bleuté, pauvres en faune et flore, d'environnement marin peu profond. La réinterprétation stratigraphique du « Burdigalien » et de l'« Helvétien » a eu pour conséquence que certaines de ces marnes sableuses furent attribuées au Burdigalien en variation latérale de faciès des molasses bioclastiques [13], et d'autres au Langhien. Depuis, l'étage « Helvétien » a été éliminé de la nomenclature internationale [31]. Simultanément, l'évolution des connaissances sur les foraminifères planctoniques de type pré-orbulines (*Globigerinoides bisphericus*, *Globigerinoides sicanus* et *Praeorbulina glomerosa*) ajoute à la confusion (discussion in [5]).

### 1.2. La géométrie du bassin et de son remplissage

Le BMRP est divisé en sous-bassins juxtaposés le long du cours du Rhône, de la Durance et de leurs principaux affluents. Venant du sud, la transgression marine du Miocène inférieur ennoie progressivement les zones basses puis leurs interfluves, définissant alors un paysage composé du « golfe provençal », d'îles et de hauts-fonds [13]. À la fin du Burdigalien, cette transgression met en communication le BMRP avec les bassins périalpins de l'Europe de l'Est [15,17,32]. Les molasses burdigaliennes affleurent toujours sur la périphérie des sous-bassins, tandis que, dans leurs centres, sont reconnus les dépôts marno-sableux de faciès « schlier » (par exemple, [8,9]). Comme le remplissage du BMRP était considéré comme un simple empilement stratigraphique, de l'Aquitainien au Tortonien [13,30], cette disposition singulière avait interpellé Gignoux, qui ne pouvait s'expliquer comment une transgression peut « arriver sur les bords d'un bassin avant d'en avoir envahi le centre » [17 (p. 605)].

La géométrie du contact entre ce remplissage et son substratum se fait selon plusieurs modalités : concordance stratigraphique, *onlap* passif, *onlap* divergent et comblement, principalement par des dépôts para-

liques, de vallées incisées d'origine fluviale. Cette quatrième modalité, proposée récemment [9,10,12,22,26,32], remet en question le schéma stratigraphique admis et explique notamment le contexte sédimentaire du stratotype du Burdigalien dans le bassin de Valréas (Saint-Restitut) [13,15,17,30].

### 2. Les marnes « schlier » : témoins du remplissage d'une vallée incisée

Notre méthode d'analyse [9], combinant les faciès, la biostratigraphie, l'identification des séquences de dépôt et leur cartographie par cortège de dépôt, a été étalonnée sur les dépôts du Miocène inférieur, car ce sont les mieux contraints, tant d'un point de vue stratigraphique [5,15,17,23,24] que géométrique [9,10,12,22,26,32]. Il apparaît que ces systèmes de dépôt comblent un réseau fluviale composite de vallées incisées (en rouge sur la Fig. 1a), préservé toujours en contre-haut, c'est-à-dire topographiquement au-dessus et non superposé verticalement, des dépôts plus récents [9,10]. Dès lors, les molasses burdigaliennes, bioclastiques à mixtes, ne peuvent plus être interprétées comme des variations latérales de faciès avec les marnes sableuses à faciès « schlier » ou à leur équivalent des marnes de Faucon dans le bassin de Valréas [13,29,30]. La succession stratigraphique miocène est maintenant réinterprétée comme un empilement composite de dépôts, déboîtement et emboîtement se succédant (Fig. 2).

La morphologie sur laquelle se sont déposées les marnes sableuses était celle d'un réseau fluviale de vallées incisées (en vert sur la Fig. 1b) développé en contrebas, c'est-à-dire topographiquement en dessous et non superposé verticalement, de celui comblé par le Miocène inférieur [9,10]. La surface érosive basale est associée à une érosion fluviale subaérienne, marquée localement par la préservation de paléosols en position d'interfluves et surlignée de dépôts fluviaux résiduels [9,10] (Fig. 2). Sa cartographie montre une première branche suivie jusqu'au front de la nappe de Digne (Tanaron, Châteauredon) et une seconde branche qui remonte vers le nord en direction de Lyon (Vienne). L'ampleur de l'incision d'une quarantaine de mètres à l'amont (Tanaron) atteint plus de 300 m à l'ouest d'Avignon [27]. Le comblement débute localement par un empilement de sables azoïques ; il est

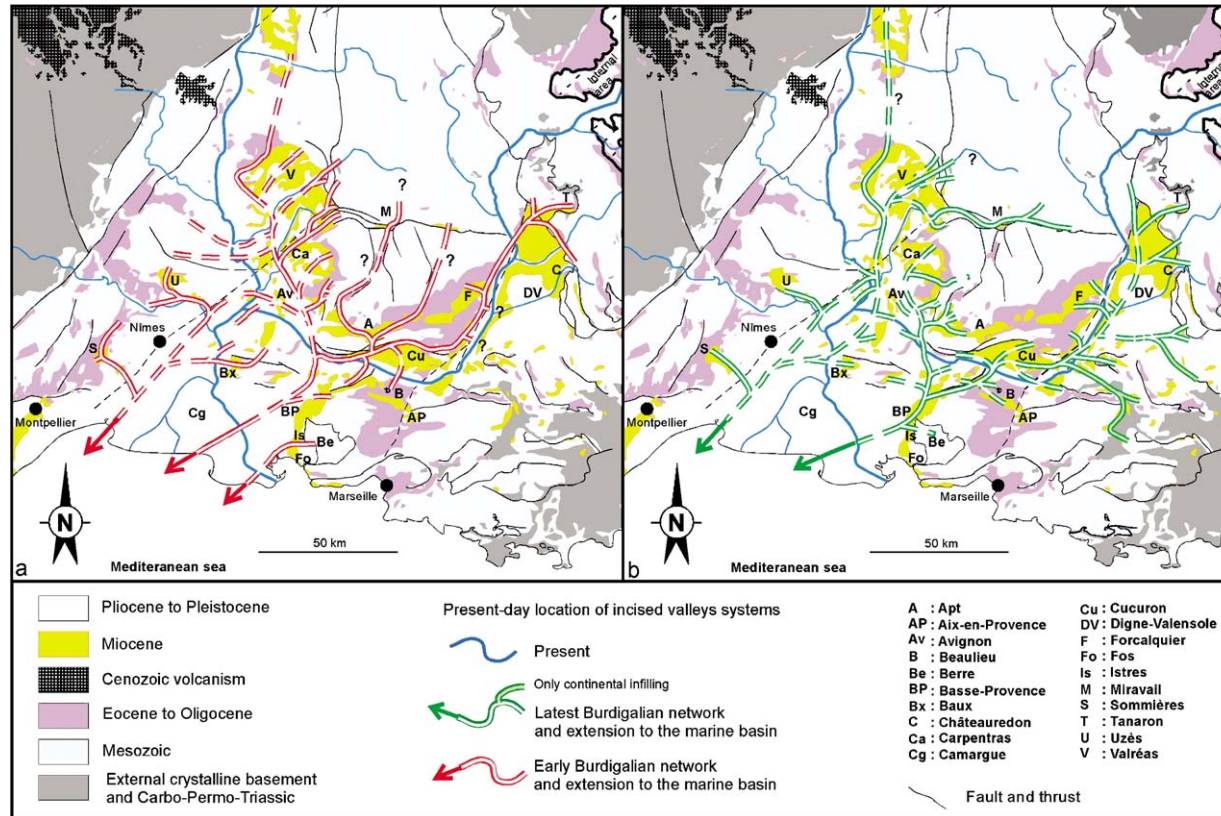


Fig. 1. Reconstitution des réseaux fluviaux du Burdigalien basal (a) et du Burdigalien terminal (b) dans le bassin molassique rhodano-provençal. Cette reconstitution est en position actuelle ; elle ne tient pas compte des mouvements tangentiels fini-miocènes. Elle est contrainte par les affleurements et des profils sismiques (bassins de Valréas, basse Provence, Avignon, Digne et Camargue) dans un cadre stratigraphique précisé. L'existence de ces réseaux indique que le bassin molassique rhodano-provençal était vidangé, pour tout ou partie, à chaque limite de séquence correspondant à une chute du niveau marin. Par son débâtement par rapport au premier réseau et l'ampleur de l'incision, le réseau fluvial du Burdigalien terminal est une structure morphologique majeure. Cette réorganisation des réseaux de drainage est contrainte par la déformation tectonique et l'activation de plis.

Fig. 1. Fluvial networks in the Rhone-Provence Molassic Basin: (a) Earliest Burdigalian, (b) Latest Burdigalian. The reconstitution is proposed in present-day configuration, without any restoration of Late Miocene alpine thrusts. It is constrained by outcrops and seismic profiles, in a precise stratigraphic framework. The reorganisation of the drainage networks is due to tectonic deformation.

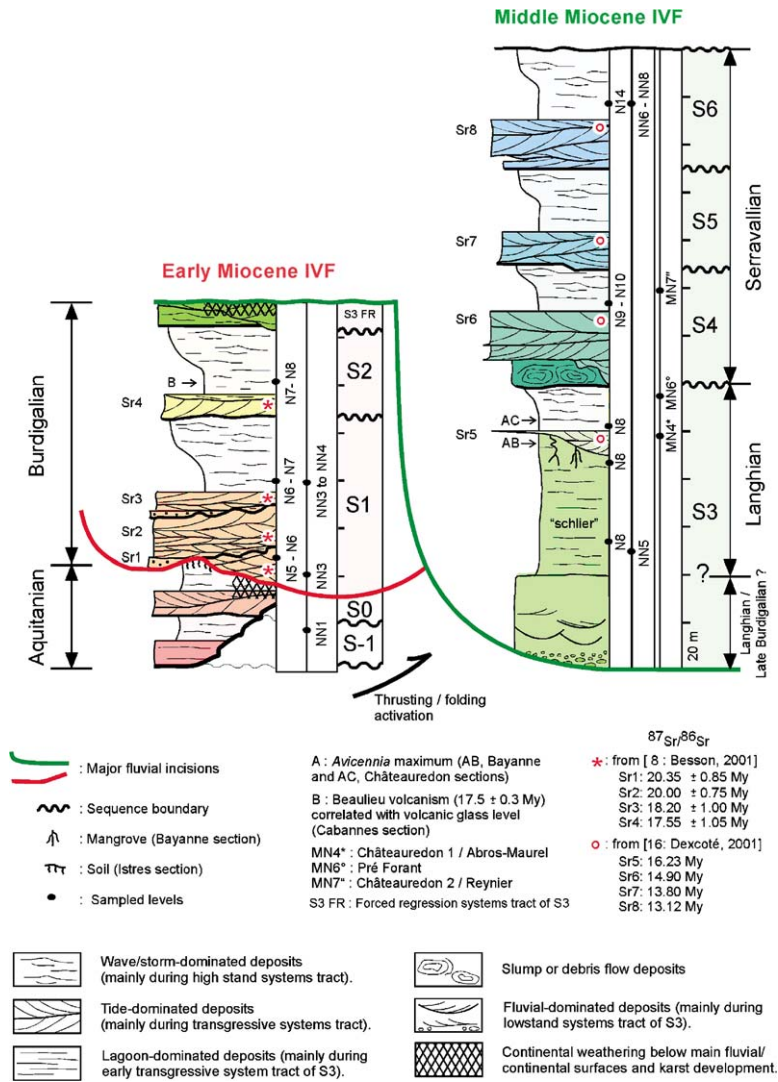


Fig. 2. Cadre litho-, bio-, chronostratigraphique de la série sédimentaire du bassin molassique rhodano-provençal. La série miocène est une succession de séquences ( $S_i$ ) de dépôt qui présentent chacune un cortège transgressif, représenté par des calcaires bioclastiques à silicoclastiques, dominés par la marée (les « Molasses » *Auct.*) et un cortège de haut niveau marin argilo-calcaire à argilo-sableux dominé par les vagues de beau temps ou de tempête. Le cortège transgressif et le cortège de haut niveau marin sont séparés par la surface d'inondation maximale. La séquence S3 présente un prisme de régression forcée, FR, particulièrement bien développé, superposé aux dépôts de l'Aquitanien et du Burdigalien et un prisme de bas niveau de sables azoïques, à la base du remplissage marin de la vallée incisée. Les foraminifères planctoniques (N Zones), le nannoplancton calcaire (NN Zones), les faunes de rongeurs (MN Zones), un événement pollinique (le maximum à *Avicennia*), les datations isotopiques (strontium), les manifestations du volcanisme de Beaulieu fournissent un cadre bio- et chronostratigraphique précis. Le remplissage (IVF, *incised valley fill*) de deux grandes incisions fluviales (vallées incisées) caractérisent le Miocène inférieur et moyen du BMRP. Un tel schéma montre que les calcaires molassiques du Burdigalien ne passent pas en variation latérale de faciès aux marnes sableuses « schlier » et doivent servir de guide à une révision des corrélations stratigraphiques.

Fig. 2. Litho- bio- and chronostratigraphic framework of the Rhone-Provence Molassic series. From Aquitanian to Serravallian, the Miocene series is made of a succession of sequences ( $S_i$ ) with a constant organisation: the TST is made of tide dominated clastic carbonates and sandstones, whereas the HST (marls and sands) is wave dominated. Foraminifera (N), nanofossils (NN) and rodent (MN) Zones are indicated, with a pollen event (the *Avicennia maximum*, A), Beaulieu volcanism (B) and strontium isotope ages. Two large incised valley fills (IVF) characterise the BMRP filling.

suivi par le dépôt des marnes lagunaires sableuses au début de la transgression marine (Fig. 2). Le comblement de ces rias et l'envolement des interfluves a été diachrone selon leur situation dans le bassin et l'ampleur de l'incision basale. Les marnes de haut niveau de la séquence S6 se sont déposées à la fin du Serravallien dans un paysage enfin régularisé.

Cette rupture de la continuité stratigraphique correspond au plus important contraste faciologique pouvant être décrit dans la série miocène [9]. En environnement carbonaté, cette chute s'enregistre par le développement d'un prisme sableux à bioclastique dû à la régression forcée à la base de S3, suivi d'une émergence marquée par une surface oxydée, durcie et karstifiée (Fig. 2), sur laquelle viennent en *onlap* des dépôts silicoclastiques [9]. En environnement silicoclastique, comme au front de la nappe de Digne dans le « Vélodrome » [18], cette chute correspond au système fluviatile de Facibelle [12], emboîté dans la molasse marine supérieure de Tanaron et limité au sommet par une surface d'émergence [27].

### 3. L'âge de l'incision et de son remplissage

La surface d'érosion fluviatile peut être datée par l'âge des ultimes dépôts sous-jacents et celui des premiers dépôts sus-jacents (Fig. 2). Nous avons utilisé huit types de repères stratigraphiques afin de préciser l'âge des cortèges sédimentaires du BMRP.

#### 3.1. Les foraminifères

La reconnaissance du Miocène inférieur n'appelle pas de réserve [5,10,22,24,32]. Les marnes de haut niveau marin de la séquence S1 renferment *Globigerinoides altiapertura* [24]. Pour dater le début du remplissage de la vallée incisée, le meilleur élément de datation est l'apparition des pré-orbulines qui caractérisent la zone du même nom (N8, base du Langhien) dans les marnes de la base de la séquence S3. Ces marnes affleurent notamment dans les bassins de Sommières, Valréas [30], de basse Provence dans la carrière Lafarge à Fos-sur-mer [5,24] et celle de Bayanne à Istres [21]. Les premières orbules, *Orbulina universa*, se rencontrent en basse Provence [5], dans les marnes sableuses du niveau de condensation de la séquence S4.

Les marnes de haut niveau de la séquence S6 sont datées dans le bassin de Cucuron (ravin du Loup) par l'association de *N. mayeri* et *N. cf. acostaensis* (sensu W.A. Berggren) et attribuées aux zones N14–15.

#### 3.2. Les ostracodes

L'analyse des ostracodes n'a pas permis de confirmer la variation latérale de faciès entre les marnes de faciès « schlier » et les dépôts du Burdigalien [13,30], chacun étant caractérisé par une association faunistique propre [9].

#### 3.3. Le nannoplancton calcaire

Les interlits marno-sableux de la partie basale du cortège transgressif de S1 sont attribués à la nannozone NN3 par la présence de *Sphenolithus belemnus* dans le bassin de Valréas (coupes de Saint-Restitut et de Montbrison-Fontbonau [23]) et dans celui d'Apt (coupe de Notre-Dame-des-Lumières [9]). Les marnes du cortège de haut niveau de S1 sont datées par *Helicosphaera ampliapertura* de la nannozone NN3–4 dans le bassin de Digne [12] et dans les bassins de Carpentras (Vénasque), Forcalquier (Ganagobie) et Valréas (Saint-Restitut, Montbrison-Fontbonau). Dans le bassin de Forcalquier, les marnes du cortège de haut niveau de la séquence S3 ont livré seulement *Sphenolithus heteromorphus*, suggérant la zone NN5 [22]. Il faut toutefois mentionner que l'utilisation du nannoplancton calcaire est délicate sans un support stratigraphique plus complet. Les remaniements de nannofossiles sont omniprésents dans la série miocène du BMRP : *Helicosphaera ampliapertura* se retrouve jusqu'au Tortonien dans la quasi-totalité des échantillons analysés, des marqueurs du Campanien au Maastrichtien dans le Miocène inférieur de Vénasque et d'Uzès, d'autres du Paléogène dans les bassins d'Apt, de basse Provence (Salon-de-Provence), Carpentras (Vénasque), Forcalquier (Ganagobie) et de Valréas.

Dans le bassin de Cucuron et dans les marnes de Saint-Pantaléon dans celui de Valréas, les marnes de haut niveau de la séquence S6 ont livré un nannoplancton calcaire des zones NN6sup–NN8, comparable à celle de Jujurieux [3 (échantillon n° 15)].

### 3.4. Les micromammifères

Le gisement de Châteauredon 1 est au-dessus de la deuxième surface d'érosion (en vert sur la Fig. 2). Sa faune de rongeurs est caractérisée par l'association *Democricetodon* et *Megacricetodon*, la présence de *M. lalai* lui confère une position chronologique intermédiaire entre, d'une part, le gisement de Langenmoosen, plus jeune et, d'autre part, celui d'Oberdorf, plus ancien [4] : il appartient à la seconde moitié de la zone MN4 et son âge est estimé entre 16 et 16,6 Ma [28].

### 3.5. Les pollens

Au-dessus de la surface d'érosion (en vert sur la Fig. 2), nos analyses polliniques ont révélé un fort développement de pollens d'*Avicennia*, caractérisant une mangrove, à la fois en position amont au front de la nappe de Digne comme à Châteauredon où *Avicennia* dépasse 5 % du total pollinique, *Pinus* exclu et en position aval, à Bayanne, où *Avicennia* dépasse 3 % du total pollinique, *Pinus* exclu. Leurs localisations se situent de part et d'autre de la surface d'inondation maximale, mfs, du comblement estuarien de la vallée du Burdigalien terminal. Dans la coupe de référence de La Rierussa (Catalogne, Vallès-Pénédès), on a enregistré un brusque pic d'*Avicennia* (plusieurs échantillons où *Avicennia* représente de 7 à 4 % du total pollinique, *Pinus* exclu) vers la base du Langhien [7,20]. Dans cette coupe ainsi que dans d'autres coupes du secteur, aucun autre niveau sous-jacent ou sus-jacent ne montre de fréquences aussi élevées en pollen d'*Avicennia*, qui ne dépasse jamais 1 % du total pollinique, *Pinus* exclu. Ce maximum pollinique a également été enregistré au même niveau dans la coupe voisine de San Pau d'Ordal [7]. Il signe assurément l'optimum climatique miocène bien mis en évidence par Miller et al. [25]. On en déduit que les maxima en *Avicennia* notés en Provence, certes moindres parce qu'enregistrés à une latitude plus haute, signent pareillement le maximum thermique du Miocène, ici situé précisément dans le Langhien.

### 3.6. La stratigraphie isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Des analyses isotopiques  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ont été réalisées sur des bioclastes comme huîtres, pectens et

bryozoaires. Les valeurs ont été reportées sur une courbe synthétique regroupant l'ensemble des valeurs récentes du strontium [14]. La base du cortège transgressif de la séquence S1 dans le bassin de Carpentras est datée à  $20,35 \pm 0,85$  Ma et son sommet à  $18,2 \pm 1,0$  Ma [8–10]. En basse Provence, le cortège transgressif de la séquence S2 est daté à  $17,55 \pm 1,05$  Ma [9,10] et celui de la séquence S3 à 16,23 Ma [9,16].

### 3.7. La géochronologie K–Ar

Nous avons échantillonné tous les niveaux glauconieux de la série miocène pour réaliser des datations radiométriques par méthode K–Ar. L'ensemble des mesures réalisées sur des glauconies présentant tous les critères nécessaires de qualité se sont avérées plus anciennes d'1,5 à 2 Ma que les âges fournis par la biostratigraphie conventionnelle. Dans les marnes du haut niveau de la séquence S6 du bassin de Cucuron, cet écart est de l'ordre de 1,6 Ma, différence entre la proposition K–Ar obtenue ( $13,1 \pm 0,2$  Ma) et l'estimation à partir des foraminifères et des nanoflores (11,5 Ma). Cet écart s'interprète par l'existence de remaniements de glauconies des dépôts sous-jacents, voire du Paléogène et/ou du Crétacé et transportées sur des distances inconnues, remaniements déjà attestés par l'inventaire des nanofossiles dans les dépôts miocènes (cf. 3.3).

### 3.8. La présence de verres volcaniques

L'échantillonnage pour la recherche des microfaunes correspond à plus de 350 prélèvements au sein de la série miocène, répartis dans tous les sous-bassins. La présence de verres volcaniques a été reconnue dans les échantillons prélevés dans les marnes du haut niveau marin de la séquence S2 des coupes de Beaulieu et des Cabanes, en bordure de l'étang de Berre. La préservation de leur cassure conchoïdale atteste l'absence de remaniement et permet la corrélation avec l'épisode volcanique de Beaulieu daté à  $17,5 \pm 0,3$  Ma [2].

### 3.9. Synthèse des datations

Le découpage séquentiel pour le Miocène inférieur et le Miocène moyen est entièrement calibré par la biostratigraphie et la stratigraphie isotopique (Fig. 2). La chute du niveau marin relatif est enregistrée tout d'abord par les régressions forcées (Fig. 2 : FR S3),



datées du Burdigalien terminal, suivies par la phase d'incision fluviale. Cet âge est cohérent avec celui de la chute du niveau marin proposé sur la charte des cycles eustatiques [19] et celui déduit des courbes isotopiques [1]. Les éléments de datation donnent un âge Langhien au remplissage marin transgressif de ce réseau fluviale de vallées incisées.

Pour dater la fin de l'empreinte de l'incision fluviale sur le paysage, l'association de *N. mayeri* et *N. cf. acostaensis* indique N14–15 et le nannoplancton calcaire NN6sup à NN8. Foraminifères et nannofossiles indiquent un âge voisin de 11,5 Ma (sensu Haq et al. [19]). Ceci confirme l'attribution au Serravallien terminal des marnes de haut niveau de la séquence S6.

#### 4. Implications stratigraphiques

Une incision fluviale est désormais caractérisée au Burdigalien terminal dans le BMRP (Fig. 1). Atteignant localement plus de 300 m, elle ne peut être rapportée à une seule baisse glacio-eustatique de l'océan global, mais est accentuée par une déformation régionale, principalement plicative, dont les modalités spatiales varient selon l'héritage structural [9]. L'existence d'un tel réseau fluviale fini-Burdigalien, déboîté par rapport aux vallées incisées burdigaliennes et emboîté dans les formations antérieures, modifie considérablement les corrélations stratigraphiques et les reconstitutions paléogéographiques jusqu'ici proposées.

En limitant les implications au seul domaine stratigraphique, il faut désormais (a) abandonner l'idée selon laquelle les unités lithostratigraphiques sont superposées verticalement, (b) ne plus considérer en variation latérale de faciès les molasses burdigaliennes et les marnes sableuses de type «schlier» : dans le Sud-Est de la France, ces marnes sableuses sont langhiennes et caractérisent des dépôts paraliques transgressifs, (c) replacer les récents résultats stratigraphiques obtenus dans le bassin de Digne dans ce nouveau cadre morphologique et (d) discuter toutes les corrélations qui avaient été établies précédemment dans le BMRP et qui ne prenaient pas en compte le déboîtement de la deuxième génération de vallées par rapport à la première, suivi de l'emboîtement des dépôts du Miocène moyen.

#### Remerciements

Nous remercions V. Apostolescu, E. Cavalucchi, Y. Callec, B. Dalrymple, J. Dellenbach, S. Denneboug, M. Ferrandini, J. Gattacceca, R. Guérin, L. Guy, N. James, C. Javaux, V. Delhaye-Prat, O. Fonta, M. Giraudmailet, J.-L. Lesueur, C. Seyve pour leurs travaux respectifs sur le Miocène rhodano-provençal et leurs amicales et fructueuses discussions ; l'Andra, le centre CEA de Cadarache, la municipalité d'Istres, la société Lafarge, le parc naturel régional du Luberon et Total pour le soutien qu'ils ont apporté au projet. Nous remercions également les deux relecteurs de ce compte-rendu, Claude Grandjacquet et Serge Ferry, pour leurs utiles suggestions. Contribution Isem (UMR 5554) n° 2005-006. Contribution UMR 8148 – Ides n° 2004–006.

#### Références

- [1] V.S. Abreu, J.B. Anderson, Glacial eustasy during the Cenozoic sequence stratigraphic implications, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 82 (1998) 1385–1400.
- [2] J.-P. Aguilar, G. Clauzon, A. de Goër de Hervé, H. Maluski, J. Michaux, J.-L. Welcomme, The MN3 fossil mammal-bearing locality of Beaulieu (France): Biochronology, radiometric dating and lower age limit of the Early Neogene renewal of the mammalian fauna in Europe, *Newslett. Stratigr.* 34 (1996) 177–191.
- [3] J.-P. Aguilar, W.A. Berggren, M.P. Aubry, D.V. Kent, G. Clauzon, M. Benammi, J. Michaux, Mid-Neogene Mediterranean marine-continental correlations: an alternative interpretation, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Plaeoecol.* 204 (2004) 165–186.
- [4] J.-P. Aguilar, P.O. Antoine, J.Y. Crochet, N. Lopez Martinez, G. Métais, J. Michaux, J.-L. Welcomme, Les mammifères du Miocène inférieur de Beaulieu (Bouches-du-Rhône, France), comparaison avec Wintershof-West et le problème de la limite MN 3/MN 4, *Coloquios de Paleontología, Madrid, Spec. Publ.* 1 (2003) 1–24.
- [5] R. Anglada, Le Burdigalien–Langhien dans le secteur des étangs (Bouches-du-Rhône, France), livret-guide excursion du Groupe français du Néogène, Travaux du laboratoire de géologie historique et de paléontologie, Université de Provence–Saint-Charles 1987, 17 p.
- [6] L.R. Bartek, P.R. Vail, J.B. Anderson, P.A. Emmet, S. Wu, Effects of Cenozoic ice sheet fluctuations in Antarctica on the stratigraphic signature of the Neogene, *J. Geophys. Res.* 96 (1991) 6753–6778.
- [7] M. Bessedik, L. Cabrera, Le couple récif-mangrove à San Pau d'Ordal (Vallès-Pénédes, Espagne), témoin du maximum transgressif en Méditerranée nord-occidentale (Burdigalien supérieur–Langhien inférieur), *Newslett. Stratigr.* 14 (1985) 20–35.

- [8] D. Besson, Stratigraphie isotopique Sr dans les séries miocènes du bassin d'avant-pays alpin du Sud-Est de la France : Intérêt et limitation de la méthode, rapport ENS des Mines de Paris, 2001, 55 p.
- [9] D. Besson, Architecture du bassin rhodano-provençal miocène (Alpes, SE France) : relations entre déformation, physiographie et sédimentation dans un bassin molassique d'avant-pays, thèse, ENS des Mines de Paris, 2005, *Mém. Sci. Terre ENS Mines de Paris* (à paraître).
- [10] D. Besson, G. Clauzon, R. Couëffé, Y. Dexcoté, S. Ferry, G. Jiménez-Moreno, O. Parize, J.-L. Rubino, J.P. Suc, B. Tessier, Le Néogène du bassin d'avant-pays rhodano-provençal, livret-guide excursion congrès international « Strati 2002, Lyon », *Publ. spéc. Soc. géol. France* (en dépôt à la Société géologique de France), 2002, 162 p.
- [11] G. Clauzon, J.-P. Aguilar, J. Michaux, Relation temps – sédimentation dans le Néogène méditerranéen français, *Bull. Soc. géol. France* 5 (1989) 361–372.
- [12] P. Crumeyrolle, J.-L. Rubino, G. Clauzon, Miocene depositional sequences within a tectonically controlled transgressive-regressive cycle, in: D.I.M. Macdonald (Ed.), *Sedimentation, Tectonics and Eustasy. Sea level changes at active margins*, Int. Assoc. Sediment. Sp. Publ. 12, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1991, pp. 373–390.
- [13] G. Demarcq, Étude stratigraphique du Miocène rhodanien, thèse d'État, Université de Paris, 1962, *Mém. Bur. Rech. Geol. Min. Orléans* 61 (1970) 1–257.
- [14] S. Dennebouy, Mise en évidence et caractérisation de la variabilité haute fréquence du rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  du strontium océanique, thèse, ENS des Mines de Paris, *Mém. Sci. Terre ENS Mines Paris*, 2001, 204 p.
- [15] C. Depéret, Note sur la classification et le parallélisme du système miocène, *Bull. Soc. géol. France* 19 (1892) 170–266.
- [16] Y. Dexcoté, Architecture et évolutions des faciès des séquences de dépôts du Miocène de basse Provence, DEA ENSMP, UPMC, ENSPM, rapport TOTAL, 2001, 45 p.
- [17] M. Gignoux, *Géologie stratigraphique*, 5<sup>e</sup> édition, Masson, 1960, 759 p.
- [18] P. Gigot, C. Grandjacquet, D. Haccard, Evolution tectonosédimentaire de la bordure septentrionale du bassin tertiaire de Digne depuis l'Eocène, *Bull. Soc. géol. France* 16 (1974) 128–139.
- [19] J. Hardenbol, J. Thierry, M.B. Farley, T. Jacquin, P.C. de Graciansky, P.R. Vail, Cenozoic Sequence Chronostratigraphy, in: P.C. de Graciansky, J. Hardenbol, T. Jacquin, P.R. Vail (Eds.), *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*, Soc. Econ. Petrol. Mineral. Spec. Pub. 60 (1998), Chart.
- [20] G. Jiménez-Moreno, Utilización del análisis polínico para la reconstrucción de la vegetación, clima y estimación de paleoaltitudes a lo largo del arco alpino en europeo durante el Mioceno (21–8 m.a.), thèse, Université de Grenade, Espagne, et université Lyon-1, 2005, 311 p.
- [21] G. Jiménez-Moreno, S. Iaccarino, J.-L. Rubino, Miocene of the Berre Lagoon area (Southern France): Palynology and biostratigraphy, *Doc. Lab. Géol. Univ. Lyon* 156 (2002) 135–136.
- [22] J.-L. Lesueur, J.-L. Rubino, M. Giraudmailliet, Organisation et structures internes des dépôts tidaux du Miocène rhodanien, *Bull. Soc. géol. France* 6 (1990) 49–65.
- [23] E. Martini, Late Oligocene and Early Miocene calcareous nannoplankton (remarks on French and Moroccan sections), *Newslett. Stratigr.* 18 (1971) 75–80.
- [24] M. Maurel-Ferrandini, Reconstitution paléogéographique du Burdigalien du littoral de la chaîne de la Nerthe et de la région des étangs (Bouches-du-Rhône, France), thèse, Université de Provence, *Travaux du laboratoire de géologie historique et de paléontologie*, Université de Provence–Saint-Charles, 7, 1976, 135 p.
- [25] K.G. Miller, M. Feigenson, J.D. Wright, B. Clement, Miocene isotope reference section, Deep Sea Drilling Project Site 608: an evaluation of isotope and biostratigraphic resolution, *Paleoceanography* 6 (1991) 33–52.
- [26] O. Parize, J.-L. Rubino, D. Besson, G. Clauzon, J. Colson, B. Dalrymple, C. Javaux, C. Laporte-Galaa, J.M. Villain, H. Soudet, Architecture and internal organization of bioclastic sandbodies infilling incised valley fill complexes in the Miocene Carpentras–Avignon basins, field-trip guide book international meeting « Anatomy of carbonate bodies, Marseille 2001 », rapport Total–ENS Mines de Paris (en dépôt à la Société géologique de France), 2001, 40 p.
- [27] O. Parize, D. Besson, J.-L. Rubino, Dans le bassin miocène rhodano-provençal, l'ampleur de l'érosion fluviale à la base du Miocène moyen est-elle releuable d'une seule amplification tectonique ?, *Publ. Assoc. Sédiment. Fr.* 38 (2003) 384–385.
- [28] O. Parize, J.-P. Aguilar, D. Besson, G. Clauzon, P. Crumeyrolle, J.-L. Rubino, Commentaire de l'article de Renaud Couëffé et Olivier Maridet, Découverte de deux gisements à micromammifères du Burdigalien supérieur dans la molasse marine du bassin de Digne (Alpes de Haute-Provence, SE France) : Implications stratigraphiques et tectoniques, *Eclog. Geol. Helv.* 96 (2) (2003) 197–207 ; *Eclog. Geol. Helv.* (soumis).
- [29] S. Pouyet, L. David, G. Demarcq, G. Latreille, G. Carbonnel, A. Prieur, M. Philippe, M. Laurain, D. Pajaud, H. Cappetta, R. Barbillat, J.-P. Chevalier, Le faciès « Marnes bleues » du Burdigalien du bassin de Faucon–Mollans–Malaucène (Sud-Est de la France) : Essai de synthèse paléocéologique et paléogéographique, *Géol. France* 12 (1984) 123–130.
- [30] S. Pouyet, G. Carbonnel, G. Demarcq, The Burdigalian historical stratotype in the Rhodanian area, in: A. Montanari, G.S. Odin, R. Coccioni (Eds.), *Miocene Stratigraphy – An integrated approach*, *Dev. Palaeontol. Statigr.* 15 (1997) 25–32.
- [31] RCMNS, *Proc. Vth Congress*, 1975, Bratislava, 1976, 69 p.
- [32] J.-L. Rubino, J.-L. Lesueur, L. Guy, G. Clauzon, Le Miocène inférieur et moyen du bassin rhodanien. Stratigraphie séquentielle et sédimentologie, *Publ. Spéc. Assoc. Sédim. Fr.*, 1990, 67 p.
- [33] E. Suess, *Das Antlitz der Erde – La face de la terre*, Armand Colin, Paris, 1900, 878 p.