

ABSTRACT

The main goal of this study is to monitor the high-frequency palaeoenvironmental changes occurring during a marine transgression in mixed carbonate-siliciclastic sedimentary systems. Based on a well-established bio- and sequence-stratigraphic framework, a narrow time window in the Bimammatum Zone of the Late Oxfordian is investigated. Seven shallow platform sections (Swiss Jura, Lorraine), two deep platform sections (Haute-Marne, Swabian Jura), and one basin section (SE France) have been logged and analysed in detail. Then, the deposits have been interpreted in terms of palaeoenvironments and sequence- and cyclostratigraphy with a high time resolution. Facies and microfacies analysis allows to propose depositional models for the Swiss Jura platform and the other studied areas. The high-resolution sequence- and cyclostratigraphic analysis permits defining hierarchically stacked depositional sequences: medium-scale, small-scale, and elementary sequences, formed through orbitally controlled sea-level changes with periodicities of 400, 100, and 20 kyr, respectively.

This study investigates deposits comprised in the first half of a medium-scale sequence, corresponding to two small-scale sequences, each composed of five elementary sequences. In the shallow platform sections, an elementary sequence generally consists of one to four beds including more or less developed marl intervals. In the deep platform sections, an elementary sequence generally consists of one or two limestone beds with a more or less developed marl interval. In the basin section, an elementary sequence is defined by one marl-limestone couplet.

The good correlation of depositional sequences over long distances between the seven shallow platform sections and the similar number of elementary sequences in all sections are valuable arguments that allocyclic processes must have been involved in the formation of these depositional sequences. Additional factors such as the position on the platform and the pre-existing morphology have to be considered in the formation of depositional sequences on a shallow platform. The presence of thickness variations at the scale of small-scale and elementary sequences reveals variable sediment accumulation rates, interpreted

as resulting mainly from differential subsidence due to the activity of tectonic blocks. The relief created by tectonics therefore contributed significantly to the general facies distribution. Furthermore, the irregular distribution of siliciclastics can be explained by localized depressions, which were created by differential subsidence and served as depocenters.

The vertical and lateral distribution of facies, oncoids, and benthic foraminifera is investigated within the narrow high-resolution time framework established (20-kyr time resolution). Significant lateral facies changes are evidenced by comparison of time-equivalent small-scale and elementary sequences between the Swiss Jura sections. They reflect the dynamics and complexity of sedimentary systems where juxtaposed sub-environments evolved and shifted through space and time.

Four types of oncoids are defined based on surface morphology, configuration and composition of the cortex, and the encasing sediment. Micrite-dominated oncoids (types 1 and 2) have a smooth surface and *Bacinella-Lithocodium* oncoids (types 3 and 4) display a lobate surface. The stratigraphic and spatial distribution of these oncoid types shows a correlation with the sequence-stratigraphic evolution, and thus with relative sea-level fluctuations. At the scale of 100-kyr and 20-kyr sequences, type 1 and 2 oncoids are preferentially found around sequence boundaries and in transgressive deposits, while type 3 and 4 oncoids are preferentially found around maximum floodings and in highstand deposits. This implies that changes of water energy and water depth were direct controlling factors. Discrepancies in oncoid distribution point to additional controlling factors. Platform morphology defines the distribution and type of the lagoon where the oncoids flourished. A low accumulation rate is required for oncoid growth. Additionally, humidity changes in the hinterland act on the terrigenous influx, which modifies water transparency and trophic level and thus plays a role in the biotic composition and diversity in the oncoid cortex. This study demonstrates that oncoids are valuable proxies for high-resolution palaeoenvironmental and palaeoecological studies.

The foraminifer assemblages of the Swiss Jura sections include agglutinated forms (Textularids), in

a lower amount porcelaneous forms (Miliolids), and locally hyaline foraminifera (only *Lenticulina*). The distribution of porcelaneous and hyaline foraminifera shows a correlation with the sequence-stratigraphic evolution. Miliolids are preferentially found in the highstand deposits of the elementary and/or small-scale sequences. The hyaline foraminifera, rare in the studied sections, are preferentially found in the transgressive deposits of elementary sequences. Consequently, the benthic foraminifera are indirectly linked to relative sea-level (accommodation changes) and indirectly to climate changes (sediment and nutrient input).

The distributions of the benthic foraminifer *Mohlerina basiliensis* and *Bacinnella-Lithocodium* oncoids show a strong correlation. The co-occurrence of these two components suggests that they require similar ecological conditions. In addition, the successively later occurrence of *M. basiliensis* from “distal” to “proximal” sections illustrates the stepwise flooding of the platform and thus implies a dependence on normal-marine conditions.

Clay-mineral assemblages and stable isotopes give palaeoenvironmental information on the scale of 400 kyr and 100 kyr but a higher time resolution is difficult to obtain probably due to time averaging by sedimentological and/or diagenetic processes. The medium-scale trends of the kaolinite content and K/I ratio between all sections from shallow platform to basin show a correlation, particularly around the medium-scale SB Ox6+ and MF Ox6+. Clay mineral distribution was not only controlled by climate changes but also by relative sea-level changes and platform morphology. Carbon and oxygen isotope analysis shows minor fluctuations ($\pm 1\%$) that probably reflect variations of local environmental conditions (e.g., salinity, temperature, trophic level).

The Swiss Jura platform shows similarities with the modern Belize platform. For example, the presence of a siliciclastic source area in the hinterland, the influence of inherited topography on the platform morphology, and general facies distribution are common features for both platforms.

* * *

RÉSUMÉ

Le but principal de cette étude est d'examiner les changements paléoenvironnementaux de haute fréquence survenant durant une transgression marine dans des systèmes sédimentaires mixtes silico-carbonatés. Basée sur un cadre biostratigraphique et séquentiel bien établi, une fenêtre de temps précise dans la zone à Bimammatum de l'Oxfordien supérieur est étudiée. Sept coupes de plate-forme peu profonde (Jura suisse, Lorraine), deux coupes de plate-forme profonde (Haute-Marne, Jura souabe) et une coupe de bassin (SE France) ont été levées et analysées en détail. Les dépôts ont ensuite été interprétés en terme de paléoenvironnements, de stratigraphie séquentielle et cyclostratigraphie avec une haute résolution dans le temps. L'analyse des faciès et microfaciès permet de proposer des modèles de dépôt pour la plate-forme du Jura Suisse et les autres zones d'étude. L'analyse séquentielle et cyclostratigraphique de haute résolution permet de définir l'empilement hiérarchique des séquences de dépôt (séquences à moyen terme, à court terme et élémentaires) formées par les fluctuations du niveau marin avec des périodicités de 400, 100, et 20 ka respectivement, contrôlées par les cycles orbitaux.

Cette étude examine les dépôts situés dans la première moitié d'une séquence à moyen terme, correspondant à deux séquences à court terme, chacune composée de cinq séquences élémentaires. Dans les coupes de plate-forme peu profonde, une séquence élémentaire consiste généralement de un à quatre bancs incluant des intervalles marneux plus ou moins développés. Dans les coupes de plate-forme profonde, une séquence élémentaire consiste généralement de un à deux bancs calcaires avec un intervalle marneux plus ou moins développé. Dans la coupe de bassin, une séquence élémentaire est définie par un banc calcaire et un intervalle marneux.

La bonne corrélation des séquences de dépôt sur de longues distances entre les sept coupes de plate-forme peu profonde ainsi que le nombre similaire de séquence élémentaires dans toute les coupes sont des arguments valables pour montrer que des processus allocycliques doivent avoir joué un rôle dans la formation de ces séquences de dépôt. Des facteurs additionnels tels que la position sur la plate-forme et la morphologie pré-existante doivent être considérée

dans la formation des séquences sur une plate-forme peu profonde. La présence de variations d'épaisseurs à l'échelle des séquences élémentaires et à court terme révèle des taux d'accumulation sédimentaire variables, interprétés comme résultant principalement de la subsidence différentielle due à l'activité tectonique de blocs. Le relief créée par la tectonique contribue aussi significativement à la distribution générale des faciès. De plus, la distribution irrégulière des dépôts terrigènes peut être expliquée par des dépressions locales, créées par la subsidence différentielle, et servant de dépôts-centres.

La distribution verticale et horizontale des faciès, des oncoïdes et des foraminifères benthiques est étudiée dans le cadre de temps haute résolution établi (résolution temporelle de 20 ka). Des changements de faciès latéraux sont mis en évidence par comparaison des séquences élémentaires et à court terme entre les coupes du Jura suisse. Ils reflètent la dynamique et complexité des systèmes sédimentaires où des environnements juxtaposés évoluent et se modifient dans le temps et dans l'espace.

Quatre types d'oncoïdes sont définis à partir de la morphologie de surface, la configuration et composition du cortex et le sédiment encaissant. Les oncoïdes dont le cortex est dominé par la micrite (types 1 and 2) ont une surface lisse tandis que les oncoïdes riche en *Bacinella-Lithocodium* (types 3 and 4) ont une surface lobée. La distribution stratigraphique et spatiale de ces types d'oncoïde montre une corrélation avec l'évolution séquentielle et donc les fluctuations du niveau marin relatif. A l'échelle des séquences élémentaires et à court terme, les oncoïdes de type 1 and 2 sont préférentiellement trouvés autour des limites de séquence et dans les cortèges de dépôt transgressifs tandis que les oncoïdes de type 3 and 4 sont préférentiellement trouvés autour des maxima d'inondation et dans les cortèges de haut niveau marin. Cela implique que des changements d'énergie et de profondeur d'eau ont été des facteurs de contrôle direct. Les disparités dans la distribution des oncoïdes suggèrent des facteurs de contrôle additionnel. La morphologie de la plate-forme définit la distribution et le type de lagon où les oncoïdes se développent. Un faible taux d'accumulation sédimentaire est requis pour la

croissance des oncoïdes. Des changements d'humidité dans l'arrière-pays agissent sur l'influx terrigène ce qui modifie la transparence et le niveau trophique de l'eau et joue donc un rôle dans la composition et la diversité biotique dans le cortex des oncoïdes. Cette étude démontre que les oncoïdes sont des indicateurs valables pour des études paléoenvironnementales et paléoécologiques de haute résolution.

Les assemblages de foraminifères des coupes du Jura suisse comprennent des formes agglutinées (Textularidés), dans une plus faible proportion des formes porcelanées (Miliolidés) et localement des foraminifères hyalins (seulement *Lenticulina*). La distribution des foraminifères porcelanés et hyalins montre une corrélation avec l'évolution séquentielle. Les Miliolidés sont préférentiellement trouvés dans les cortèges de dépôt de haut niveau marin des séquences élémentaires et/ou à court terme. Les foraminifères hyalins, rare dans les coupes étudiées, sont préférentiellement trouvés dans les dépôts transgressifs des séquences élémentaires. Par conséquent, les foraminifères benthiques sont indirectement liés aux changements du niveau marin relatif (changements d'accommodation) ainsi qu'aux changements climatiques (apports sédimentaires et de nutriments).

La distribution du foraminifère benthique *Mohlerina basiliensis* et des oncoïdes riches en *Bacinnella-Lithocodium* montre une forte corrélation. La coexistence de ces deux composants suggère qu'ils requièrent des conditions écologiques similaires. De plus, l'apparition de plus en plus tardive des *M.*

basiliensis des coupes distales aux coupes proximales illustre l'inondation par étape de la plate-forme et implique alors une dépendance aux conditions marines.

Les assemblages des minéraux argileux et les isotopes stables donnent des informations paléoenvironnementales à l'échelle des séquences de 400 ka et 100 ka; une plus haute résolution est difficile à obtenir probablement à cause de l'homogénéisation du temps par des processus sédimentologiques et/ou diagénétiques. Les tendances à moyen terme du contenu en kaolinite et du rapport kaolinite/illite entre toutes les coupes de la plate-forme peu profonde au bassin montre une corrélation, particulièrement autour de la limite de séquence SB Ox6+ et du maximum d'inondation à moyen terme MF Ox6+. La distribution des minéraux argileux n'était pas seulement contrôlée par des changements climatiques mais aussi par des changements du niveau marin relatif et de la morphologie de la plate-forme. L'analyse des isotopes de l'oxygène et du carbone montre des fluctuations mineures ($\pm 1 \text{ ‰}$) qui reflètent probablement des variations de conditions environnementales locales (par exemple salinité, température, niveau trophique).

La plate-forme du Jura suisse montre des similarités avec des plate-formes actuelles, notamment celle du Bélize. Par exemple, la présence d'une zone source de siliciclastiques dans l'arrière-pays, l'influence de la topographie héritée sur la morphologie de la plate-forme et la distribution générale des faciès sont des caractéristiques communes aux deux plate-formes.

* * *