

The Purbeckian facies of the Boulonnais: a tsunami deposit hypothesis (Jurassic–Cretaceous boundary, northern France)

Jean-François Deconinck^{a*}, François Baudin^b, Nicolas Tribouillard

^a Sédimentologie et géodynamique, UMR 8577 CNRS, université des sciences et technologies de Lille, sciences de la Terre, 59655 Villeneuve-d'Ascq cedex, France

^b Département de géologie sédimentaire, UPMC et CNRS ESA 7073, 4, place Jussieu, case 117, 75252 Paris cedex 05, France

Received 8 February 2000; accepted 7 March 2000

Communicated by Jean Dercourt

Abstract – We reconsider the origin of the Purbeckian deposits (Uppermost Jurassic–Lowermost Cretaceous) of the Boulonnais. Made up of an erosional conglomerate overlain by wood fragments and clays containing continental and marine fossils, they are attributed to a tsunami triggered by either an earthquake or the impact of a bolide in the palaeo-Barents Sea. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Boulonnais / Jurassic–Cretaceous / Purbeckian / tsunami

Résumé – Les faciès purbeckiens du Boulonnais : l'hypothèse d'un dépôt de tsunami (passage Jurassique–Crétacé, Nord de la France). Nous proposons une nouvelle interprétation des dépôts purbeckiens (Jurassique terminal–Crétacé basal) du Boulonnais. Le Poudingue de la Rochette, qui ravine les grès des Oies sous-jacents, est surmonté par des argiles à débris ligneux et contient des fossiles marins et continentaux, se serait mis en place sous l'influence d'un tsunami. Le tsunami aurait été déclenché, soit par un séisme, soit par l'impact d'un astéroïde en mer de Barents. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Boulonnais / Jurassique–Crétacé / Purbeckien / Tsunami

Version abrégée

1. Introduction. Contexte géologique

Les formations argileuses, carbonatées et gréseuses du Kimméridgien–Tithonien du Boulonnais se sont déposées en domaine marin à proximité du massif Londres–Brabant. À la fin du Jurassique, la tendance régressive qui caractérise l'ensemble du Bassin de Paris conduit au dépôt des faciès laguno-lacustres du Purbeckien, puis aux faciès continentaux du Wealdien (Crétacé inférieur). La succession stratigraphique du Tithonien supérieur et des faciès purbeckiens est particulièrement bien exposée en falaises littorales entre Wimereux et la Pointe aux Oies (*figure 1*). La présence d'ammonites a permis d'établir une zonation biostratigraphique précise, jusque

dans les grès des Oies, qui appartiennent à la zone à *Kerberites kerberus*. Il s'agit de grès bioclastiques à ciment carbonaté déposés dans un environnement d'avant-plage. Cette formation est surmontée par les faciès purbeckiens bien exposés à la pointe aux Oies (*figure 2*) et les faciès continentaux du Wealdien.

À la pointe aux Oies, la partie tout à fait supérieure des Grès des Oies présente un banc, dont le toit est caractérisé par des ondulations de longueur d'onde pluri-métrique et une amplitude pouvant atteindre 50 cm [1]. Localement, les ondulations s'apparentent à des déformations en blagues à tabac (*figure 3*). De fréquents placages de conglomérats à galets pluri-centimétriques se rencontrent à la surface de ce banc, qui est surmonté par environ 50 cm d'argiles. Ces argiles contiennent de

* Correspondence and reprints: Jean-François-Deconinck@univ-lille1.fr

très nombreux fragments de bois, dont la longueur peut atteindre le mètre, des galets mal classés identiques à ceux constituant les placages conglomératiques et des éléments bioclastiques plus ou moins pyritisés, d'origines marine et continentale : lamellibranches, gastéropodes, dents de poissons et gyrogonites de charophytes, qui correspondent typiquement à *Porochara fusca*, espèce dont l'extension stratigraphique va de l'Oxfordien au Bédoulien, mais les spécimens bien typés se rencontrent seulement jusqu'à la fin du Berriasien (détermination et communication personnelle de P.-O. Mojon). Cette succession particulière est surmontée par deux mètres d'argiles silteuses verdâtres, puis par des constructions stromatolithiques correspondant aux « calcaires en choux-fleurs » (figure 2).

À la pointe de la Rochette, la succession est caractérisée par le développement de l'ensemble conglomératique (poudingue de la Rochette), qui peut atteindre 2 m d'épaisseur (figure 4). Cet ensemble ravine fortement les grès des Oies sous-jacents [21, 24].

2. Discussion

Des structures comparables aux ondulations observées au sommet des grès des Oies ont été fréquemment décrites et interprétées comme des séismites [3, 9, 20, 22]. Ces déformations syn-sédimentaires sont principalement attribuées à des échappements de fluides, provoqués par le passage d'une onde sismique.

Une origine fluviale du poudingue de la Rochette a été initialement proposée [19], mais la présence d'une faune mixte marine et continentale, ainsi que de fragments de coraux, suggère que ce poudingue correspond à un cordon de galets déposés en bordure d'une falaise jurassique [5, 21, 24]. À la pointe aux Oies, l'équivalent latéral du poudingue de la Rochette correspond à des placages conglomératiques, ainsi qu'à des argiles à galets et fragments de bois. Ces dépôts constituent vraisemblablement l'enregistrement sédimentaire d'un événement catastrophique survenu au voisinage du passage Jurassique–Crétacé. La présence d'argiles à nombreux fragments de bois suggère la destruction soudaine d'une forêt par submersion brutale du domaine continental voisin, représenté par le massif Londres–Brabant. Des inondations soudaines pourraient être à l'origine de tels dépôts, mais cette hypothèse ne s'accorde pas avec le caractère marin du poudingue de la Rochette.

Le poudingue de la Rochette et son équivalent latéral de la pointe aux Oies présentent des caractéristiques communes avec les dépôts résultant de tsunami, qui présentent de fortes variations latérales et consistent en conglomérats ravinant les formations sous-jacentes, surmontés de débris organiques et d'un mélange de faunes et flores marines et continentales [2, 4, 6, 25]. Parmi les événements responsables de tsunamis, les tremblements de terre sont de loin les plus fréquents [17]. À la fin du Jurassique, une forte activité sismique de la région est probable, puisque la sédimentation du Kimméridgien–Tithonien est fortement contrôlée par l'activité tectoni-

que, qui pourrait être liée à l'ouverture de l'océan Atlantique [8, 23].

Une hypothèse alternative fait appel aux effets d'une vague géante consécutive à l'impact en mer d'un astéroïde. Un tel impact s'est produit au voisinage de la limite Jurassique–Crétacé en mer de Barents, où un cratère (Mjølner) de 40 km de diamètre a été identifié [10, 11, 14, 26]. L'impact s'est produit dans une mer profonde d'environ 300 à 500 m, générant une vague d'amplitude équivalente à la profondeur du point d'impact. Une telle vague peut se propager sur plusieurs milliers de kilomètres, tout en conservant une amplitude de plusieurs dizaines de mètres [16]. On peut envisager qu'une telle vague a atteint le Boulonnais, s'amplifiant à l'approche des petits fonds marins qui caractérisaient le Boulonnais à la fin du Jurassique. Bien que l'âge des dépôts purbeckiens du Boulonnais ne soit pas bien établi, par manque de marqueurs biostratigraphiques, ils pourraient être contemporains de l'impact identifié en mer de Barents.

Un tel événement doit nécessairement avoir laissé une empreinte sur d'autres coupes des faciès purbeckiens. Ceux-ci affleurent au nord de l'île d'Oléron, où un conglomérat surmonté de fragments décimétriques de bois est intercalé dans la série stratigraphique [7]. En l'absence de marqueurs biostratigraphiques, la corrélation entre le poudingue de la Rochette et le poudingue identifié à Oléron n'est pour l'heure qu'une hypothèse, mais le caractère singulier de la succession commune aux deux régions suggère cette corrélation.

Sur la coupe de Durlston Bay (Dorset), aucun conglomérat n'est intercalé dans la succession stratigraphique qui couvre principalement le Berriasien [12]. En revanche, deux événements majeurs, correspondant à des inondations du milieu lagunaire, se sont produits : l'un, à la base de la succession, indique l'ennoiement d'une forêt [13], l'autre, plus haut dans la série, marque une brève transgression, ayant conduit au développement temporaire d'une faune marine bien préservée dans le « Cinder Bed » [27]. Ces événements pourraient être liés à un tsunami important, mais, là encore, des corrélations fiables manquent encore entre cette coupe de référence, celle d'Oléron et celle du Boulonnais.

3. Conclusion

Une nouvelle interprétation des faciès à la base de la série purbeckienne du Boulonnais est proposée. Ces faciès semble correspondre à un dépôt de tsunami, qui pourrait avoir été déclenché par un tremblement de terre. Cette hypothèse s'accorde avec l'activité sismique probable du Boulonnais, qui était situé, à la fin du Jurassique, en bordure de l'océan Atlantique, en voie d'ouverture. Un tsunami provoqué par la chute d'un astéroïde (impact de Mjølner) en mer de Barents, au voisinage du passage Jurassique–Crétacé, constitue une hypothèse alternative, dont l'argumentation nécessite que soient levées les difficultés de corrélation au sein des faciès purbeckiens.

Plus de 30 impacts importants ont été reconnus sur la Terre au cours des derniers 150 Ma [18]. Certains d'entre eux, qui se sont produits en mer, sont nécessai-

rement à l'origine de dépôts sédimentaires particuliers, qu'il convient d'identifier et qui constituent d'excellents outils de corrélation à grande distance.

1. Introduction. Geological background

Late Jurassic (Kimmeridgian–Tithonian) sediments of the Boulonnais (northernmost France) were deposited in marine environments close to the London–Brabant Massif. The sedimentary succession dominantly composed of shales, marls, marly limestones and sandstones recorded fluctuations of the sea-level as well as tectonic rejuvenations of the London-Brabant Massif [15, 23]. By the end of the Jurassic, the regressive trend that characterized the Paris basin is expressed by the deposition of the Purbeckian and the Wealden (Lower Cretaceous) facies. Because reliable biostratigraphic markers are rare or absent, the age of the Purbeckian facies is not well established and the Jurassic–Cretaceous boundary cannot be located precisely. It probably lies within the Purbeckian facies which encompass the stratigraphic interval extending from the Tithonian open-marine 'Grès des Oies' formation (*Kerberites kerberus* zone) and the continental Wealden facies. These sediments are particularly well exposed along coastal cliffs between Wimereux and Pointe aux Oies (North of Boulogne-sur-Mer, figure 1). The best outcrops are located at Pointe aux Oies and at Pointe-de-la-Rochette.



Figure 2. The Purbeckian facies from Pointe aux Oies. The Purbeckian facies consist of clays and stromatolitic limestones overlying the undulating top of the Grès des Oies Fm. (cf. figure 3).

Figure 2. Les faciès purbeckiens de la pointe aux Oies. Les faciès purbeckiens constitués d'argiles puis de calcaires stromatolitiques surmontent les grès des Oies, dont le sommet présente un banc ondulé (cf. figure 3).

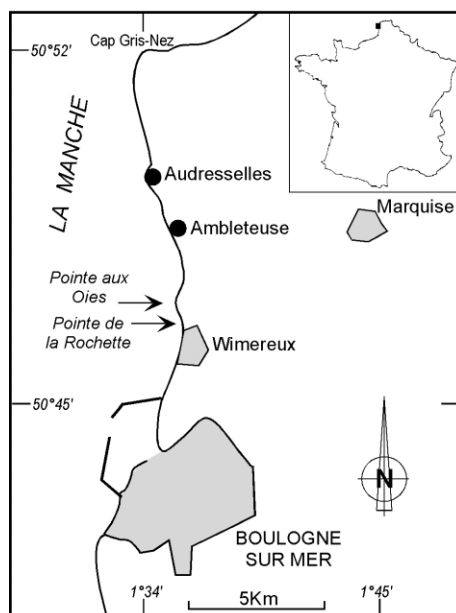


Figure 1. Location map of the Purbeckian deposits in the Boulonnais between Pointe de la Rochette and Pointe aux Oies.

Figure 1. Localisation géographique des faciès purbeckiens du Boulonnais entre la pointe de la Rochette et la pointe aux Oies.

At Pointe aux Oies, above the Grès des Oies, the Purbeckian facies consist of dark-grey to greenish-grey clays, lacustrine limestones and stromatolites (figure 2). The Late Tithonian Grès des Oies formation is dominantly composed of bioclastic calcareous sandstones deposited in shoreface environments close to the western end of the London–Brabant Massif. The topmost part of the formation consists of an unusual sandstone bed, showing a sharp base that contrasts with a metric to plurimetric-wavelength undulating top (figure 3). The amplitude of the undulations reaches 50 cm. These structures were previously observed by Ager and Wallace, [1] and called 'diapiric sedimentary structures', including 'streamers, cusps and point-up'. The sandstone bed is overlain by decimetre-thick lenses of conglomerate and by a mixture of pebbles and abundant pluridecimetre-long wood fragments embedded in a clayey matrix. This horizon contains various marine and non-marine bioclasts including pelecypods, gastropods, fish teeth, and charophytes. Charophytes identified by P.O. Mojon correspond to *Porochara fusca* which are known from the Oxfordian to the Bedoulian, but well-defined specimens occur only until the end of the Berriasian (P.O. Mojon pers. comm.). The pebbles include limestones and sandstones reworked from well-known Palaeozoic or Jurassic formations cropping out inland, and siliceous rocks whose origin is still unknown.

At Pointe de la Rochette, the conglomerate called Poudingue de la Rochette, which occurs as lenses at

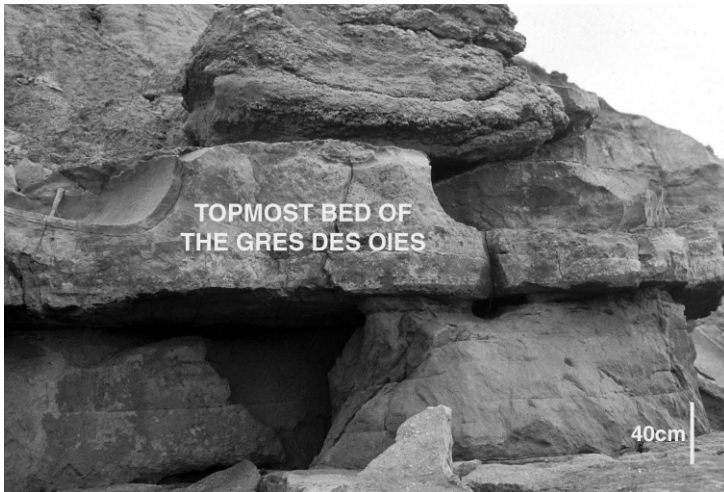


Figure 3. Example of syn-depositional features in the topmost bed of the Grès des Oies formation. This bed is overlain by wood fragments, pebbles and mixed continental and marine fossils embedded in a clayey matrix.

Figure 3. Exemple de déformations syn-sédimentaires observées au sommet des grès des Oies. Ce banc déformé est surmonté par des placages conglomératiques et par des argiles riches en galets, fragments de bois et fossiles d'origines marine et continentale.

Pointe aux Oies, is much more developed. The conglomerate reaches 2 m thick and shows an erosional base (figure 4).

2. Discussion

2.1. The topmost bed of the Grès des Oies

The undulating top of the Grès des Oies formation suggests syndepositionary or early diagenetic soft deformations. Ager and Wallace [1] suggested that 'water saturation, loading and perhaps a sudden shock caused the lower sandstone to go quick and to break through weak

places'. These deformations may correspond to fluid escape features of unconsolidated bioclastic sands. Similar soft deformations have been described in numerous papers and interpreted as seismites [3, 9, 20, 22].

2.2. Previous interpretations of Poudingue de la Rochette environment

As previously mentioned by Parent [21] and Pruvost [24], the conglomerate is clearly separated from the underlying Grès des Oies formation by an erosional surface. The Poudingue de la Rochette was first considered of fluvial origin [19], but its pebbles are of local origin (Paleozoic and Jurassic rocks from the Boulonnais) and include shells of marine pelecypods and fragments of corals suggesting a marine origin. As mentioned by Parent [21], the conglomerate seems to have formed at the foot of a Jurassic cliff and is since considered as a coastal bar [5, 24].

At Pointe aux Oies, the lateral equivalent of the Poudingue de la Rochette corresponds to an accumulation of wood-fragments occurring together with pebbles and a mixture of marine, terrestrial and fresh-water fauna. This mixture constitutes the most striking feature of the series. The accumulation of large pieces of wood could suggest the destruction of a nearby forest from the adjacent London–Brabant Massif by a sudden river flooding, but this interpretation is not consistent with the marine origin of the Poudingue de la Rochette.

2.3. A tsunami deposit?

Most tsunamis correspond to large sea-waves associated to faulting during earthquakes, but submarine slides, volcanic eruptions as well as impacts of bolides in the ocean may also generate a tsunami. Tsunamis have long wavelength and cross the ocean at several hundred $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. In deep water environments, the wave height is low (1–2 m) but in shallower coastal areas, the amplitude of the wave increases greatly. Consequently, large

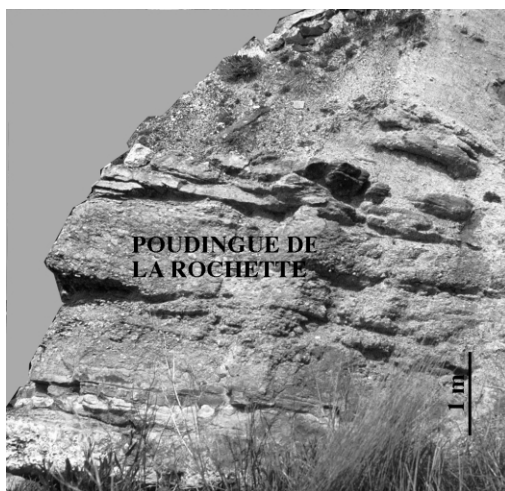


Figure 4. At Pointe de la Rochette, the thickness of the erosional conglomerate reaches two metres. It dominantly contains pebbles of Devonian, Carboniferous and Jurassic rocks from the Boulonnais area.

Figure 4. À la pointe de la Rochette, l'épaisseur du poudingue atteint 2 m. Ce poudingue est principalement constitué de galets de roches du Dévonien, du Carbonifère et du Jurassique connues dans le Boulonnais. Il ravine les grès des Oies sous-jacents.

volumes of sediments may be reworked and transported landward at first, and then seaward by outgoing flows. Recent tsunamis following earthquakes have been well described in Japan [17]: oncoming waves climb up the coastal dunes and temporarily flood inland areas; subsequent outgoing dense flows carry sedimentary particles seaward.

In the Boulonnais, the occurrence of earthquakes during the end of the Jurassic is likely, sedimentation during the Kimmeridgian and the Tithonian being partly controlled by tectonic events probably associated with the opening of the Atlantic Ocean [8, 23]. Surprisingly, seismites have never been described in the Kimmeridgian and Tithonian deposits of the Boulonnais, perhaps because this area was too far from the epicentres. The only known seismites in the Late Jurassic of the Paris basin were described in the Oxfordian of Normandy [9]. The deposits described in this paper correspond to a single event in the Late Jurassic (Early Cretaceous?) succession of the Boulonnais, while one can expect to observe several seimite horizons in case of seismic record. In addition, the influence of an earthquake could explain the soft deformations of the topmost bed of the Grès des Oies but cannot explain either the conglomerate or the wood-rich clayey horizon, except if the earthquake was immediately followed by a tsunami.

The Poudingue de la Rochette and its lateral equivalent outcropping at Pointe aux Oies, composed of wood-fragments together with poorly-sorted pebbles and mixed continental and marine faunas show features evoking tsunami facies whose ancient equivalents display coarse sediments showing an erosional base commonly followed by abundant organic detritus [2, 4, 6, 25]. The Poudingue de la Rochette and its lateral equivalent may therefore correspond to tsunami deposits triggered by an earthquake.

An alternative explanation consists in the effect of a wave generated by an extraterrestrial impact occurring in a marine environment. Such an impact occurred in the palaeo-Barents Sea during the Volgian stage (144–140 Ma) including the Jurassic–Cretaceous boundary and was responsible for the so-called Mjølnir impact crater [10, 14]. Shocked quartz and a strong iridium anomaly occur in the Volgian to Early Berriasian (144–140 Ma) sediments drilled in the Barents Sea [11]. An iridium anomaly is also recorded in northern Siberia at the Jurassic–Cretaceous boundary [28]. Unfortunately, the age of the Purbeckian deposits of the Boulonnais is not well established, but they are probably of Berriasian age (P.O. Mojon, pers. comm.), and could be coeval with the Mjølnir impact.

According to the size of the crater, the diameter of the bolide is estimated between 1 and 2 km [26]. The bolide hit a deep sea shelf, the water depth being estimated between 300 and 500 m [10], thus generating a giant wave. Initially, the height of the wave was similar to the water depth (300–500 m), but the height decreased rapidly with the distance from the target. According to Jansa

[16], such a wave may travel thousands kilometers, being still 40 m high 3 000 km from the impact area. The distance between the palaeo-Barents Sea and the Boulonnais area can be estimated at about 4 000 km. According to palaeogeographic reconstructions, several islands may have acted as barriers and the wave may have travelled over relatively shallow seas. It is therefore likely that a strongly attenuated wave may have reached the Boulonnais area. However, it is well-known that the height of a tsunami approaching shallow environments increases greatly. As the Boulonnais area was very shallow at the end of the Jurassic, it is possible that the observed sedimentary structures and deposits correspond to a sedimentary record of a tsunami triggered by the Mjølnir impact. In the near future the search for cosmic markers in the Purbeckian facies of the Boulonnais will help to test this hypothesis.

2.4. Other Purbeckian sections

Sediments reflecting the effects of a giant wave triggered by the Mjølnir impact may exist in other Purbeckian series as well. In France, Purbeckian facies crop out on coastal cliffs North of Oleron Island (south west of France). There, a conglomerate overlain by wood fragments similar to those identified at Pointe aux Oies occurs in the Purbeckian succession [7]. At present, it is not possible to correlate the successions observed at Oleron island and in the Boulonnais because accurate biostratigraphic data are still lacking, even if it is suggested by the similar specific lithofacies.

In Dorset, the type section of Durlston Bay does not show any conglomerate. According to recent investigations, the Jurassic/Cretaceous boundary may approximate to the basal group of limestones of the Cypris Free-stones Member [12] suggesting that most of the section belongs to the Berriasian and should encompass the Mjølnir impact event. Two main events are recorded in the Purbeckian of Dorset. The first at base corresponds to the flooding of a forest. Tree trunks were subsequently surrounded by stromatolites which can be seen at Fossil Forest close to Lulworth Cove [13].

The second event, located higher in the series, corresponds to the Cinder Bed which is dominantly composed of small oysters and some echinoids. It corresponds to the most obvious marine incursion into a lagoon pointing to a brief marine transgression. According to West [27], in the shallow environment the water became just about marine enough for echinoids but not for a long time, and the marine conditions were not stable for long enough for ammonites to live in this area. The small oysters could tolerate lower salinities than truly marine and still flourished when the water became rather brackish. The Cinder Bed was not the only marine incursion during deposition of the Purbeck Formation but it is the most obvious in the field. Flooding of the lagoon could be a consequence of a destruction of a barrier by a tsunami but at present there is no evidence for such an event.

3. Conclusion

A new interpretation of the Purbeckian facies of the Boulonnais is proposed. The basal part of these facies composed of an erosional conglomerate overlain by organic detritus may correspond to a tsunami deposit.

The tsunami may have been triggered either by an earthquake or a marine impact of an extraterrestrial bolide. The occurrence of earthquakes by the end of the Jurassic is consistent with the geodynamical context of the Boulonnais, but alternatively, we cannot exclude the effect of a giant wave generated by the Mjølnir impact that occurred in the palaeo-Barents Sea close to the Jurassic–Cretaceous boundary. The comparison with a few other Purbeckian sections suggests that the catastrophic event recorded in the Boulonnais may be registered elsewhere. However, uncertainties of stratigraphic

correlations and the absence of reliable biostratigraphic markers limit the comparison. The search for bio-, magneto- and chemostratigraphic data together with cosmic markers will provide arguments for one or the other hypothesis.

In sedimentary series, the recognition of instantaneous deposits due to regional-scale catastrophic events is interesting because such deposits correspond to isochronous markers providing a good tool for long distance correlations. For the last 150 Ma, more than 30 large impacts (crater > 5 km in diameter) have been identified [18]. These impacts should be registered in the sedimentary successions. Their definite recognition is often difficult but should provide extremely precise tools for correlations, especially in sediments where biostratigraphic data are not accurate enough, as in the Purbeckian.

Acknowledgements. We thank P.O. Mojon for charophytes determination, T. Guéant for his help on the observations of pebbles from the Poudingue de la Rochette and H. Chamley for improvement of the manuscript.

References

- [1] Ager D.V., Wallace P., The environmental history of the Boulonnais, France, *Proc. Geol. Ass.* 77 (1966) 385–417.
- [2] Albertao A., Martins Jr P.P., A possible tsunami deposit at the Cretaceous–Tertiary boundary in Pernambuco, northeastern Brazil, *Sediment. Geol.* 104 (1996) 189–201.
- [3] Alfaro P., Estevez A., Moretti M., Soria J.M., Structures sédimentaires de déformation interprétées comme séismites dans le Quaternaire du bassin du Bas Segura (Cordillère Bétique orientale), *C. R. Acad. Sci. Paris, série IIa* 328 (1999) 17–22.
- [4] Bondevik S., Svendsen J.I., Mangerud J., Tsunami sedimentary facies deposited by the Storegga tsunamis in shallow marine basins and coastal lakes, western Norway, *Sedimentology* 44 (6) (1997) 1115–1131.
- [5] Bonte A., Le Boulonnais, Géologie du Nord de la France, *Ann. Soc. Géol. Nord* 89 (1969) 23–46.
- [6] Bourgeois J., Hansen T.A., Wiberg P.L., Kauffman E.G., A tsunami deposit at the Cretaceous–Tertiary boundary in Texas, *Science* 241 (1988) 567–570.
- [7] Bousquet P., Contribution à l'étude stratigraphique et micropaléontologique du Jurassique et du Crétacé de l'île d'Oléron (Charente-Maritime), thèse 3e cycle, université Paris-6, 1967.
- [8] Deconinck J.-F., Chamley H., Debrabant P., Colbeaux J.-P., Le Boulonnais au Jurassique supérieur : données de la minéralogie des argiles et de la géochimie, *Ann. Soc. Géol. Nord* 102 (1983) 145–152.
- [9] Dugué O., Séismites dans le Jurassique supérieur du Bassin anglo-parisien (Normandie, Oxfordien supérieur, Calcaire gréseux de Hennequeville), *Sediment. Geol.* 99 (1995) 73–93.
- [10] Dypvik H., Attrep M. Jr., Geochemical signals of the Late Jurassic, marine Mjølnir impact, *Meteoritics and Planetary Science* 34 (1999) 393–406.
- [11] Dypvik H., Gudlaugsson S.T., Tsikalas F., Attrep M. Jr., Ferrell Jr. R.E., Krinsley D.H., Mork A., Faleide J.I., Nagy J., Mjølnir structure: an impact crater in the Barents sea, *Geology* 24 (1996) 779–782.
- [12] Feist M., Lake R.D., Wood C.J., Charophyte biostratigraphy of the Purbeck and Wealden of southern England, *Palaeontology* 38 (2) (1995) 407–442.
- [13] Francis J.E., The seasonal environment of the Purbeck (Upper Jurassic) fossil forests, *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 48 (1984) 285–307.
- [14] Gudlaugsson S.T., Large impact crater in the Barents Sea, *Geology* 21 (1993) 291–294.
- [15] Herbin J.P., Geysant J.-R., El Albani A., Colbeaux J.-P., Deconinck J.-F., Fernandez-Martinez J.-L., Proust J.-N., Vidier J.-P., Sequence stratigraphy of source rocks applied to the study of the Kimmeridgian–Tithonian in the Northwest European shelf (Dorset/UK., Yorkshire/UK. and Boulonnais/France), *Mar. Petrol. Geol.* 12 (2) (1995) 177–194.
- [16] Jansa L.F., Cometary impacts into ocean: their recognition and the threshold constraint for biological extinctions, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 104 (1993) 271–286.
- [17] Minoura K., Nakaya S., Traces of tsunami preserved in intertidal lacustrine and marsh deposits: some examples from Northeast Japan, *J. Geol.* 99 (1991) 265–287.
- [18] Montanari A., Campo B.A., Gatin A., Farinella P., Earth cratering record and impact energy flux in the last 150 Ma, *Planet. Space Sci.* 46 (2/3) (1998) 271–281.
- [19] Munier-Chalmas E., Les assises supérieures du terrain jurassique du Bas-Boulonnais, *C. R. Acad. Sci. France* 128 (1899) 1532–1535.
- [20] Owen G., Experimental soft sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples, *Sedimentology* 43 (1996) 279–293.
- [21] Parent H., Deuxième note sur le terrain Wealdien du Bas-Boulonnais, *Ann. Soc. Géol. Nord* 32 (1903) 17–48.
- [22] Plaziat J.-C., Purser B.-H., Philobos E., Seismic deformation structures (seismites) in the syn-rift sediments of the NW Red Sea (Egypt), *Bull. Soc. géol. France* (8) VI (3) (1990) 419–434.
- [23] Proust J.-N., Deconinck J.-F., Geysant J.-R., Herbin J.-P., Vidier J.-P., A sequence analytical approach to the Late Kimmeridgian–Lower Tithonian storm-dominated ramp deposits of the Boulonnais (Northern France). A landward time-equivalent to offshore marine source rocks, *Geol. Rundschau* 84 (1995) 255–271.
- [24] Pruvost P., Les subdivisions du Portlandien du Boulonnais d'après les ammonites, *Ann. Soc. Géol. Nord XLIX* (1924) 187–207.
- [25] Shiki T., Yamazaki T., Tsunami-induced conglomerates in Miocene upper bathyal deposits, Chita Peninsula, Central Japan, *Sediment. Geol.* 104 (1996) 175–188.
- [26] Tsikalas F., Gudlaugsson S.T., Faleide J.I., Collapse, infilling, and postimpact deformation of the Mjølnir impact structure, Barents Sea, *Geol. Soc. Am. Bull.* 110 (1998) 537–552.
- [27] West I.E., <http://www.soton.ac.uk/~imw/purb-al.htm>.
- [28] Zakharov V.A., Lapukhov A.S., Shenfil O.V., Iridium anomaly at the Jurassic–Cretaceous boundary in Northern Siberia, *Russ. J. Geol. Geophys.* 34 (1) (1993) 83–90.