

Stratigraphie et paléoenvironnement des dépôts volcano-détritiques à dinosauriens du Jurassique inférieur de Toundoute (Province de Ouarzazate, Haut-Atlas – Maroc)

CHRISTIAN MONTENAT¹, MICHEL MONBARON², RONAN ALLAIN³, NAJAT AQUESBI⁴, JEAN DEJAX³, JEAN HERNANDEZ⁵, DALE RUSSELL⁶ & PHILIPPE TAQUET³

Mots clés: Dinosauriens, Jurassique inférieur, Maroc, Haut-Atlas, volcanisme, sédimentation continentale
Key words: Dinosaurs, Early Jurassic, Morocco, Haut-Atlas, volcanics, continental sediments

RESUME

Le gisement de dinosauriens du Jurassique inférieur de Toundoute, à sauropode primitif (*Tazoudasaurus naimi*), est examiné sous ses aspects stratigraphiques, sédimentologiques et paléoenvironnementaux. Les couches continentales détritiques à dinosauriens, succédant en continuité à des niveaux marins carbonatés très peu épais du Lias inférieur (Hettangien-Sinemurien probables), sont rapportées au Lias moyen-supérieur. Les dépôts continentaux contiennent une part importante de produits volcanoclastiques différents des basaltes triasiques. Les centres d'émission, non connus, étaient sans doute proches. La sédimentation continentale, de type chenaux fluviaux – plaine d'inondation, reflète un climat chaud à périodes alternativement humides et sèches, ces dernières étant fortement marquées. Les deux niveaux à ossements correspondent à des coulées boueuses ayant charrié des ossements et portions de carcasses (os en connexion) sur de courtes distances. Ce mode de transport a préservé les ossements de l'érosion et favorisé un enfouissement rapide permettant leur conservation.

ABSTRACT

The Early Jurassic dinosaur site of Toundoute which yielded the basal sauropod *Tazoudasaurus naimi* is examined in the light of its stratigraphic, sedimentological and palaeoenvironmental context. A thin succession of Early Liassic marine carbonates (probably Hettangian-Sinemurian in age) is continuously overlain by continental beds with dinosaurs. These latter are assumed to be of Middle to Late Liassic age. The continental deposits include a large part of volcanoclastics, different from the Triassic basalts. The Jurassic volcanoclastics originated from an unknown but obviously close eruption centre. The continental sediments (channels and flood plain) were deposited under tropical climate conditions with alternating humid and dry episodes. The bones occur as isolated or partly articulated elements (parts of carcasses). The two bone-beds are related to typical mud-flows. This type of transport protected the bones from erosion, and favoured their burying and fossilization.

1. Introduction

Les gisements de Dinosauriens du douar de Tabia, à environ 3 km au NE de Toundoute (province de Ouarzazate, Fig. 1), sont situés dans la partie supérieure d'un ensemble de dépôts détritiques à caractère continental, dont l'âge est discuté plus loin. Il s'agit d'une alternance de niveaux pélitiques, gréseux et microconglomératiques et de conglomérats grossiers. L'ensemble est de couleur dominante brun-rouge à gris-verdâtre à la base et brun-rouge vers le sommet où apparaissent des niveaux plurimétriques d'évaporites. L'épaisseur conservée de la série est d'environ 300 mètres.

La succession continentale de Toundoute apparaît au milieu de panneaux tectoniques qui la chevauchent ou lui sont

accolés le long d'accidents tectoniques complexes (écaillages, décrochements, failles inverses, etc.). Elle affleure donc au cœur d'une véritable fenêtre tectonique, bordée au Sud, à l'Ouest et au Nord par des plis et écaillages formés de terrains d'âge fini-Crétacé à Éocène et, au Nord et à l'Est, par le chevauchement à vergence sud d'épaisses assises de calcaires et dolomies du Lias inférieur reposant en concordance sur du Trias supérieur grésopélitique et salifère (M. Monbaron, levés cartographiques inédits). Ce dispositif tectonique complexe est situé sur le tracé du chevauchement sud-atlasique formé lors de la structuration Tertiaire (Mio-Pliocène) du versant sud du Haut-Atlas (Service géologique du Maroc, 1985).

¹ Institut Géologique Albert-de-Lapparent (IGAL), CNRS CEPAGE 32. 13, Bd de l'Hautail 95092 Cergy-Pontoise, France.

² Département de Géosciences, Université de Fribourg, Ch. du Musée 4, CH-1700 Fribourg, Suisse

³ Département Histoire de la Terre, laboratoire de Paléontologie, Muséum National d'Histoire Naturelle, UMR 5143 CNRS, 8 rue Buffon, 75005 Paris, France.

⁴ Ministère de l'Énergie et des Mines, Institut Agdal, B.P.6 208 Rabat, Maroc.

⁵ Institut de Minéralogie & Pétrographie, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse.

⁶ Museum of Natural Sciences, North Carolina State University, Box 8208, Raleigh, NC 27695, USA.

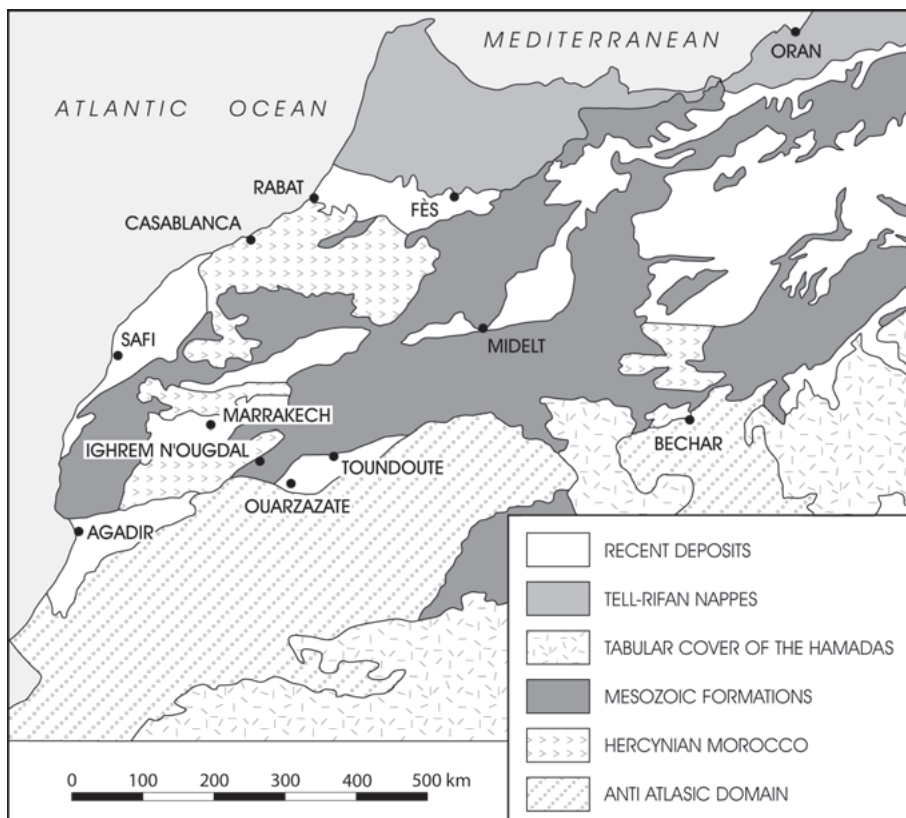


Fig. 1. Localisation du site à dinosauriens liassiques de Toundoute (Haut-Atlas, Maroc).

Fig. 1. Location of the Liassic dinosaur site of Toundoute (High-Atlas, Morocco).

La succession sédimentaire de Toundoute est examinée sous ses aspects stratigraphiques et sédimentologiques, en relations avec le gisement de dinosaures à *Tazoudasaurus naimi* (Allain et al. 2004) contenu dans sa partie supérieure. L'objectif de l'étude est double:

- préciser l'âge des dépôts situés dans un contexte paléogéographique et structural complexe.
- reconstituer les conditions de dépôt de l'assise continentale dans laquelle prennent place les niveaux fossilifères à ossements de dinosauriens.

2. Succession lithostratigraphique

L'ensemble de la succession sédimentaire est divisé en huit termes lithostratigraphiques informels, désignés de A à H, afin de faciliter la description. Ils peuvent être caractérisés brièvement comme suit, de la base au sommet (Fig. 2).

- A. Alternance de dolomies grises, pélites dolomitiques laminées et intercalations de matériel volcanique basaltique à plagioclases et minéraux ferromagnésiens altérés. Il existe au moins trois intercalations de volcanoclastites de puissance métrique (environ 30 m). Ces niveaux surmontent des pélites rougeâtres et amas de gypse.
- B. Calcaires et dolomies alternant avec des lits de pélites brun rouge ou verdâtres à débris végétaux; bancs calcaréo-dolomitiques à nombreux bioclastes, débris phosphatés et

grains de glauconie (environ 25 m). Dans la partie supérieure les carbonates montrent un aspect noduleux ou pseudobréchique, correspondant au remaniement synsédimentaire de matériaux non encore lithifiés dans une aire de dépôt instable.

- C. Couches de transition: alternance de petits bancs dolomitiques, de pélites et de grès fins rougeâtres (≤ 10 m).
- D. Pélites, grès fins et niveaux grés-conglomératiques gris à strates obliques. On note une forte prédominance du matériel volcanoclastique dès la base: sable à minéraux (feldspaths), blocs de roche volcanique bulleuse, «ponces» et fragments de cinérites laminées remaniées. Certains blocs volcaniques sont de grande taille ($\leq 0,3$ m; épaisseur environ 80 m).
- E. Alternance de pélites brun rouge, de grès fins et de grès grossiers conglomératiques. Le matériel provenant du socle devient prédominant (environ 100 m).
- F. Niveau repère du gisement inférieur à dinosauriens situé entre deux gros chenaux à cailloutis. Il s'agit d'un dépôt à dominance marno-pélique, gris verdâtre vers le bas, rubéfié vers le sommet (≤ 5 m). Outre les ossements, il existe des éléments détritiques (graviers et petits cailloutis) et des débris végétaux dispersés dans le sédiment; l'ensemble s'enrichit en matériel détritique vers le sommet (petits galets plats), toujours disséminé dans la matrice.

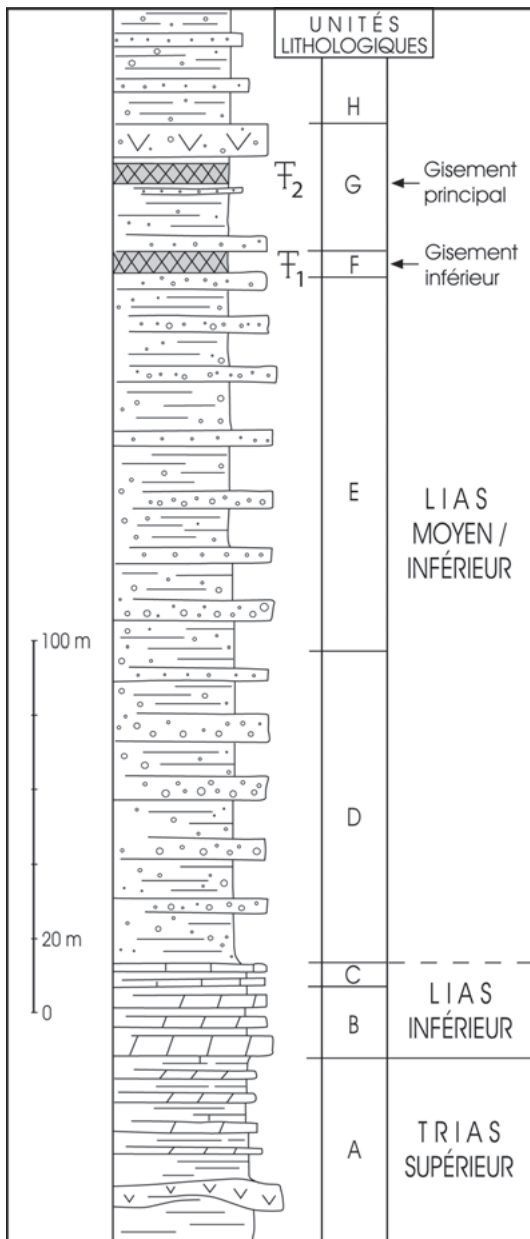


Fig. 2. Succession stratigraphique liasique de Toundoute: principales unités lithostratigraphiques.

Fig. 2. The Liassic succession of Toundoute: main lithostratigraphic units.

- G. Série péli-to-gréseuse avec dépôts sulfatés au sommet (environ 50 m). Juste sous les gypses, gisement supérieur à ossements de dinosauriens inclus dans une matrice marno-pélique analogue à celle du précédent. C'est là qu'ont été trouvés les ossements du sauropode *Tazoudasaurus* (Allain et al. 2004).
- H. Série péli-to-gréseuse sommitale à matériel plutôt fin, non étudiée (≥ 100 m). Cette unité est ravinée et coiffée par des dépôts conglomératiques holocènes.

3. Attributions stratigraphiques

Les faciès du terme A, incluant le gypse et le sel exploité au nord de Toundoute sont attribués au Trias (Service Géologique Maroc 1985). Les intercalations volcaniques de nature basaltique appuient cette attribution (Trias supérieur; Lachkar et al. 2000).

Les carbonates du terme B, d'abord des dolomies alternant avec des pélites, puis des dolomies et des calcaires coupés de délits marno-silteux à débris végétaux, enregistrent l'affermissement progressif de l'environnement marin. Certains bancs carbonatés montrent un microfaciès à oïdes, oncolithes, nombreux débris de mollusques et foraminifères benthiques ayant subi une forte dissolution et recristallisation en sparite. Bien que les microfaunes ne soient pas précisément déterminables, le microfaciès peut être rapporté, d'après J.-P. Bassoullet (comm. pers.) au Lias inférieur du domaine atlasique (Hettangien-Sinemurien probable, certainement pré-Toarcien).

Les couches de transition (terme C) font un passage rapide entre dépôts marins et continentaux, par l'intermédiaire de niveaux palustres carbonatés et d'horizons de «caliche». Les couches continentales du gisement de Toundoute sont ainsi clairement superposées, en continuité stratigraphique, aux carbonates marins du Lias inférieur.

Les couches détritiques continentales (termes D à H) riches en épisodes volcano-détritiques grossiers répondent à une dynamique sédimentaire qui implique généralement des taux de sédimentation élevés. Dans ce cas, on peut supposer que la succession de couches continentales incluant le gisement de dinosauriens, s'est déposée dans un intervalle de temps assez court, intra-liasique selon toute vraisemblance: Lias moyen-supérieur probable (environ 190 à 175 Ma, selon Gradstein & Ogg 2004). L'âge Toarcien avancé par Allain et al. (2004) pour les couches à dinosauriens, n'est pas davantage avéré du point de vue biostratigraphique. Le stade évolutif du sauropode *Tazoudasaurus* est cohérent avec un âge anté-Dogger du gisement. Les niveaux carbonatés Bajoço-Bathoniens, fréquents à l'intérieur du domaine atlasique, n'existent pas à Toundoute.

Les couches à dinosauriens de Toundoute offrent certaines similitudes avec celles de la région située plus à l'ouest, entre Ighrem n'Ougdal et la bifurcation vers Telouet, sur la route du col de Tichka (Fig. 1). Dans ce secteur, sur un Trias «classique» (comportant des grès rouges, surmontés de coulées basaltiques, elles-mêmes suivies de silts et pélites brun-rouge) repose une série carbonatée constituée de dolomies, cargneules, marnes et calcaires dolomitiques gris-beige à jaunâtre, peu épaisse (une cinquantaine de mètres), attribuée au Lias inférieur (Roch 1950). Ces couches représentent un faciès bordier, de puissance réduite, du très épais Lias carbonaté du Haut-Atlas (Georges de Dadès ou de Todra par exemple) (Michard 1976; Piqué & Boubadelli 2000).

A Ighrem n'Ougdal, ce Lias réduit est surmonté d'un complexe détritico-rubéfié présentant une alternance de pélites, silts et grès, micro-conglomérats et conglomérats grossiers, le

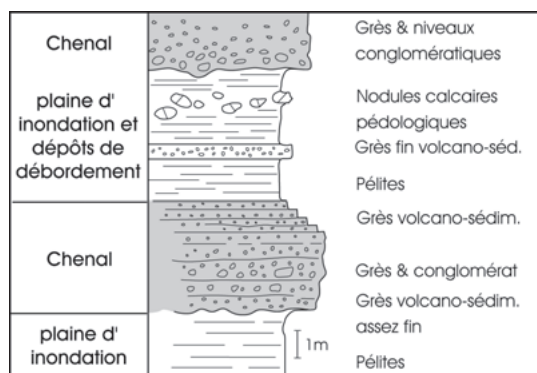


Fig. 3. Séquence type de dépôt des termes D, E: chenal-plaine d'inondation.

Fig. 3. Depositional type-sequence of units D, E: channel-flood plain.

tout étant entrecoupé de niveaux d'anciens sols calcaires, voire de passées évaporitiques, atteignant plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Au dessus, le premier niveau daté est une barre de calcaires à Inocérames du Cénomano-Turonien (Michard 1976; Piqué 1994).

Les calcaires liasiques de dépôt marin sur lesquels reposent la formation continentale de Toundoute peuvent être un équivalent latéral du Lias inférieur réduit et lagunaire d'Ighrem n'Ougdjal. Les sédiments détritiques qui les surmontent en concordance appartiennent probablement au Lias moyen-supérieur. A Toundoute, la présence de blocs calcaires à faciès typique du Lias inférieur (olistolithes) dans la partie inférieure de l'assise détritique continentale (Fig. 5G) confirme l'âge post-Lias inférieur de cette dernière.

4. Données sédimentologiques et paléoenvironnementales

Termes A à C.

L'évolution de la sédimentation dans les termes A et B va dans le sens d'une accentuation graduelle des influences marines. Dans la partie supérieure de l'unité B, les calcaires bioclastiques noduleux à graviers phosphatés et grains de glauconie signalent vraisemblablement une surface de transgression. En fait, cet intervalle transgressif, loin de se développer, périclité rapidement: en peu de mètres (terme C < 10m), la sédimentation évolue vers un régime de dépôts continentaux, d'abord palustres carbonatés, puis détritiques, fluviaux et rubéfiés. On peut supposer que le forçage de la sédimentation dans le sens de l'émergence soit sous contrôle tectonique, en relation avec l'évolution géodynamique liasique des régions atlasiques. On note par ailleurs l'instauration simultanée d'un nouveau magmatisme, dont les témoins sont présents dès la base du terme D (voir ci-dessous). Les dépôts marins liasiques (terme B) sont d'une épaisseur très réduite, moitié moins épais que dans le secteur bordier d'Ighrem n'Ougdjal évoqué plus haut. En revanche, les influences marines y sont mieux affirmées (bioclastes, foraminifères).

Terme D.

Il correspond environ au tiers inférieur des dépôts détritiques (Fig. 2). Il s'agit d'un système fluvial de type chenaux/plaine d'inondation (Figs. 2 & 3).

Les sédiments présentent les caractéristiques suivantes:

- **Les chenaux** sont des corps grès-conglomératiques lenticulaires épais de quelques mètres ($\leq 5\text{m}$) pour une extension latérale visible décamétrique à pluridécamétrique. Les chenaux sont fortement ravinants. Les dépôts, plus ou moins nettement granoclassés (des conglomérats avec galets $\leq 30\text{ cm}$, jusqu'à des sables fins) comportent souvent plusieurs séquences successives de remplissages dans un même chenal. Des épisodes grossièrement conglomératiques peuvent s'y intercaler. Les dépôts se disposent en feuillets horizontaux ou clinostatifiés. Les parties latérales de chenaux montrent des dispositions en éventail qui résultent du recouvrement en «on-lap» de surfaces d'érosion faiblement pentées (phases de débordement en fin de remplissage). Les mesures courantologiques (bords de chenaux, feuillets progradants), indiqueraient une direction de transit proche de E-W. Les sédiments des chenaux (grès et conglomérats) sont constitués de différents matériaux, soit par ordre de fréquence décroissante:
 - **Des produits volcaniques**, allant des blocs de roches volcaniques, bulleuses ou non, aux sables constitués presque exclusivement de feldspaths peu ou non altérés. Des grès sont faits de granules pluri-millimétriques de roche volcanique fortement cimentés. Ces matériaux proprement volcaniques, du sable au galet, constituent en général plus de la moitié des composants détritiques (voir plus loin).
 - **Des produits d'altération issus du volcanisme** se répartissent en deux catégories. Des grains ferrugineux noirs, totalement opaques ou incluant des fantômes de feldspaths encore identifiables, sont probablement issus des croûtes noirâtres qui s'observent à la surface de roches volcaniques sous un climat à périodes sèches accentuées. Les croûtes ferrugineuses superficielles développées dans des anfractuosités et des creux peuvent agglomérer de fines esquilles de quartz (inexistant dans la roche volcanique), de feldspaths ou de calcaire, apportées par le vent ou le ruissellement. Ces croûtes soumises à la corrosion éolienne se retrouvent en abondance, à l'état de grains de la taille des sables, dans le sédiment. La seconde catégorie est constituée de «grains verts» siliceux issus de silicifications tardives et post-éruptives (filonnets, microgécodes, concrétions mamelonnées) associées à la roche volcanique. Toujours présents, en petite quantité, ils accompagnent le remaniement du volcanisme.
 - **Les débris calcaires**, de la taille des sables à celle des galets ($\leq 5\text{cm}$), sont avec le volcanisme, les composants majeurs du sédiment. Il s'agit, dans tous les cas, de calcaires engendrés en milieu continental, dans l'aire de dépôt elle-même ou à sa périphérie immédiate. Des calcaires fins (micritiques ou microsparitisés) à traces de racines et fentes de

retrait (sheet-cracks) incluant de fines échardes de quartz, correspondent à des nodules calcaires de pédogenèse, initialement développés dans les sols de la plaine d'inondation (voir plus loin). Les débris calcaires de cette nature peuvent constituer localement le constituant essentiel des passées conglomératiques. D'autres débris calcaires (petits galets et graviers) à pisolithes vadoses et fentes de retrait arquées proviennent du remaniement de sols à croûtes calcaires («caliche») développés sous climat à périodes alternativement humides et sèches, ces dernières engendrant une évaporation intense.

Enfin, des fragments infra-centimétriques très répandus dans les grès, sont constitués de calcite fibreuse disposée en couches successives plus ou moins ondulées, ou formant des encroûtements tubulaires. Dans quelques cas, les traces sombres de fins filaments algaires buissonnants sont encore visibles (algues bleu-vert de type Girvanella). Ces débris proviennent d'encroûtements travertineux développés à l'émergence de sources ou dans des fonds d'oueds, là où subsistait une humectation locale en période sèche

- **Les matériaux issus du socle** (schistes et quartz filonien essentiellement) sont présents en faible proportion et de manière discontinue. On reconnaît dans la fraction sableuse des grains de quartz (occasionnellement polycristallins) et des débris émoussés de schistes.
- **Enfin, les débris d'os et de bois** à structure cellulaire bien visible ne sont pas rares.
- **Les dépôts de la plaine d'inondation** comportent deux types de matériaux remarquables inclus dans l'encaissant pélitique.
- **Des nodules calcaires** très durs, de teinte rose ou brique, de forme très irrégulière, atteignant la quinzaine de cm, disposés de manières discontinues ou coalescentes, forment des horizons d'accumulation calcaire dans les pélites. Il s'agit de nodules de marmorisation caractérisant des profils de sols calcimorphes formés en climat à phases sèches prononcées. Ils prennent naissance à quelques décimètres de profondeur, au niveau de la rhizosphère, sous une couverture végétale clairsemée (Freytet & Plaziat 1982). Les traces de racines sont encore observables, à l'occasion, dans les nodules, sous formes de veinules ultérieurement oblitérées par de la calcite. Le remaniement des nodules, en abondance, dans les chenaux, suppose une érosion importante de la plaine alluviale par le réseau fluvial, érosion sans doute facilitée par la faible densité du couvert végétal. Des «galets mous» décimétriques de pélites, mêlés aux conglomérats dans la partie basse des chenaux prennent parfois l'aspect d'«*armored balls*» cloutées de graviers et de petits galets à leur périphérie; ce sont des témoins de l'érosion de la plaine d'inondation par un courant torrentiel.
- Des intercalations de grès fins, souvent laminés, sont des faciès distaux de débordement issus de chenaux en période de crue. Certains de ces dépôts sont faits presque exclusivement de feldspaths plagioclases et en moindre proportion d'orthoclases, anguleux, peu ou pas altérés. La lamina-

tion peut être soulignée par des petits grains ferrugineux noirâtres, ou encore par des lits à grains très fins, proches des silts, surtout constitués d'échardes de quartz.

Le matériel volcanique présent sous forme d'éléments détritiques de taille très variée, (de 30 cm au mm) se répartit en deux groupes. Un premier groupe est formé de produits basaltiques en petits granules arrondis parfois vésiculés, présentant le plus souvent un faciès de trempe. Certains de ces fragments, montrant des textures doléritique, pourraient correspondre au remaniement de roches triasiques dont il existe des témoins volcano-détritiques dans l'unité A (voir ci-dessus). Cependant, à l'intérieur de ces fragments, ou parfois en bordure, une recristallisation des carbonates laisse supposer que ces fragments étaient encore à température élevée lors du dépôt et, par conséquent, contemporains de la sédimentation. Le deuxième groupe d'éléments, largement majoritaire, est formé essentiellement par des fragments plagioclasiques et peut être du feldspath alcalin, dans une matrice aphanitique fortement recristallisée. Leurs faciès plus différenciés pourraient être de nature trachy-andésitique. Ces éléments lithiques ou à l'état de cristaux isolés, ne montrent pas de marques de transport prolongé (contours anguleux) et proviendraient de sources relativement proches. Après les émissions basaltiques fissurales du Trias, le volcanisme montre, dès le début du Jurassique, un dynamisme plus explosif (Ouarhache et al. 2000) qui a pu favoriser la dissémination des produits et notamment de cendres feldspathiques. Ces dernières ont été collectées et transportées par un réseau hydrographique peu évolué (réseau de petits chenaux), lors de crues épisodiques. En toute hypothèse il semble acquis que ces matériaux volcaniques ne proviennent pas du remaniement des coulées triasiques mais d'une activité éruptive contemporaine de la sédimentation détritique continentale, dont les sources d'émission étaient sans doute proches.

Terme E.

Il s'étend vers le haut jusqu'au niveau repère constitué par la couche gris vert du premier gisement à dinosauriens (terme F, Fig. 2).

Il s'agit comme précédemment de l'alternance de niveaux grés-conglomératiques chenalisés et de pélites brun rougeâtre à nodules calcaires pédogénétiques, coupées de couches de grès fin. La partie haute de l'unité, exposée derrière les maisons du douar de Tabia, jusqu'au niveau du gisement, montre une succession de gros chenaux grés-conglomératiques ravinant fortement les pélites sableuses (Fig. 3). Le matériel des chenaux est grano-classé: cailloutis à la base (galets peu roulés ≤ 5 cm) passant à des grès grossiers à graviers (≤ 5 cm) vers le haut. Les grès fins sommitaux à stratification plane sont un faciès de débordement sur la plaine alluviale. Les niveaux grossiers montrent, par rapport au terme D, un enrichissement notable en matériel issu du socle (schistes, quartz filonien) et de la couverture mésozoïque (grès et carbonates du Lias). Les éléments volcanoclastiques (faciès pétrographique inchangé),

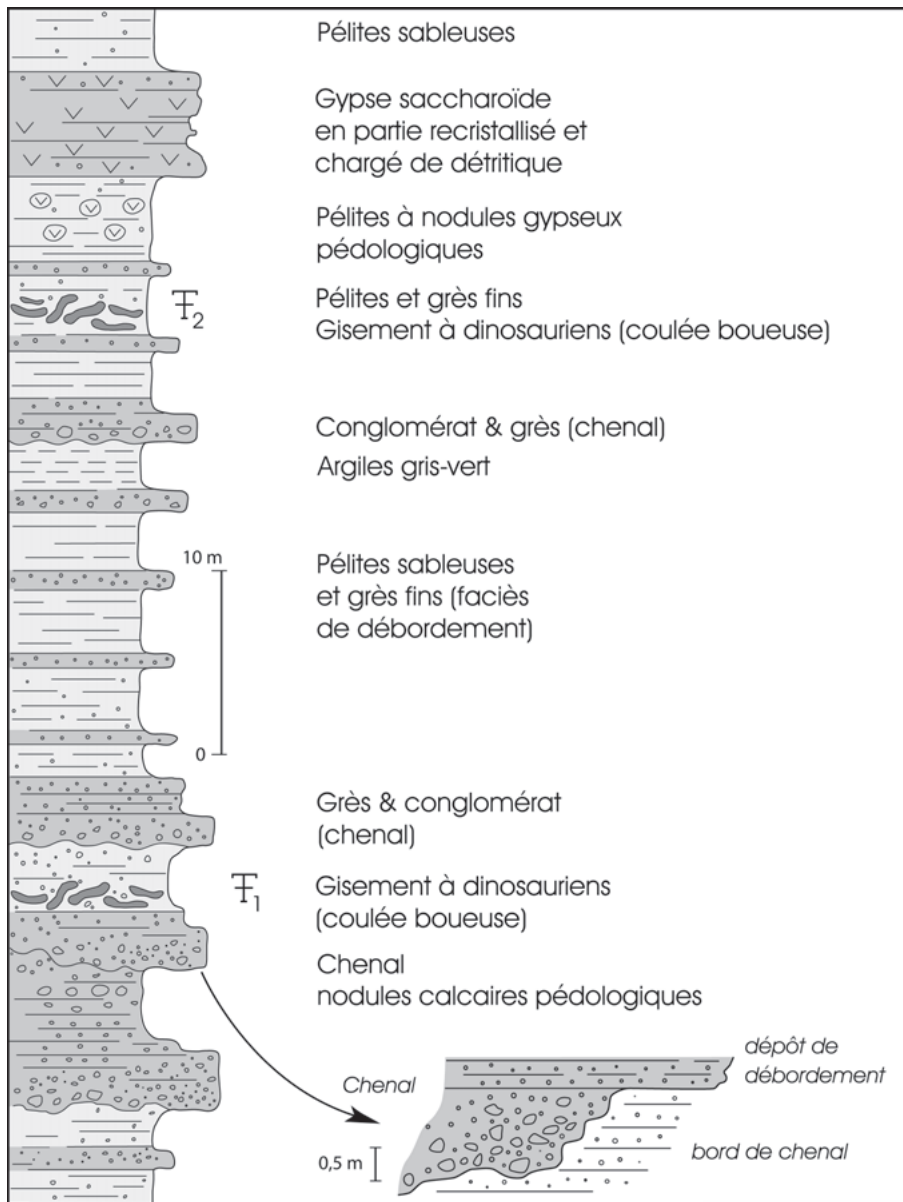


Fig. 4. Séquences de dépôts encadrant les gisements d'ossements de dinosauriens.

Fig. 4. The dinosaur bone-bearing levels and adjacent depositional sequences.

leurs produits d'altération (grains ferrugineux noirâtres) ainsi que les débris de carbonates continentaux (travertin, nodules pédogénétiques) sont toujours abondants.

Terme F: le gisement inférieur à ossements de dinosauriens

Il s'agit d'un niveau épais de 3 à 4 m constitué de pélites et de marnes indurées grises à gris vert (Figs. 2 & 4). Les ossements sont localisés vers la base. La partie sommitale est rubéfiée et s'enrichit en sable grossier et petits galets plats. Les débris végétaux sont dispersés dans tout ce niveau et abondants vers le haut. De nombreux granules (quelques mm) et petits cailloux calcaires (≤ 3 cm) «flottent» dans la matrice pélimarneuse.

Ils proviennent, pour les plus nombreux, de l'érosion de sols à croûtes calcaires de type «caliche». Cet horizon singulier (il n'en a été observé qu'un autre qui soit identique, correspondant au gisement supérieur), est le produit d'une coulée boueuse assez fluide, à matrice largement dominante et débris disséminés, répandue sur une aire peu pentée. Les ossements de reptiles contenus dans cette coulée dense ne sont ni brisés ni usés et sont demeurés pour partie en connexion, ce qui suppose qu'ils aient été transportés à l'état de tronçons de carcasses. Ainsi qu'on l'observe souvent dans ce type de dépôt, des débris lithiques de forme aplatie ont été transportés en «flottant» dans la tranche superficielle de la coulée. La teneur en débris végétaux, beaucoup plus fort ici que dans les autres

niveaux, tient vraisemblablement à la dynamique de la coulée qui a incorporé les restes de plantes sur son passage. La présence d'éléments, os ou débris végétaux, disposés verticalement dans la masse est bien caractéristique d'une coulée dense plutôt que d'un écoulement tractif fluvial (Fig. 5F).

Cette coulée boueuse est un événement exceptionnel dans le déroulement de la sédimentation locale. Elle conditionne directement la constitution du gisement de dinosauriens: la concentration et la préservation des ossements sont dues à leur enfouissement rapide dans la coulée. Les composantes ordinaires du paysage sédimentologique ne peuvent remplir les mêmes conditions: sur la plaine d'inondation (pélites) le taux de sédimentation est insuffisant pour permettre l'enfouissement rapide des ossements; dans les chenaux gréseux ou conglomératiques au contraire, les restes osseux sont présents, mais réduits à l'état d'esquilles atteignant rarement le centimètre.

Terme G.

Il correspond à la cinquantaine de mètres de dépôts surmontant le niveau du gisement inférieur (Figs. 2 & 4). Il s'agit encore d'alternances de sédiments terrigènes grossiers et fins, avec cependant des différences notables par rapport aux unités sous-jacentes.

- **Les épisodes chenalisés** sont moins épais, les dépôts moins grossiers, peu ou pas ravinants à la base; les grès sont souvent fins et laminés. Ceci peut traduire une raréfaction des apports grossiers et donc un affaiblissement des processus d'érosion, peut-être d'origine climatique (réduction des précipitations et des épisodes de crues) et/ou tectonique. A moins que ces dépôts correspondent à une position distale ou marginale du réseau des distributaires, ne recevant plus ici qu'une fraction appauvrie d'apports détritiques. Le premier épisode grossier surmontant le niveau F du gisement est un dépôt chenalisé à base ravinante, granoclassé: conglomérat à galets peu usés (socle principalement) passant à des graviers et à des sables stratifiés au sommet. Dans la partie grossière, les débris sont emballés dans une matrice périto-sableuse («*matrix-supported debris-flow*»), passant à un dépôt tractif (grès stratifiés, voire laminés) en sommet de séquence.

Il est à noter que les coulées denses sont cantonnées au niveau du gisement et des couches qui l'encadrent. En règle générale, les écoulements de ce type se répandent sur d'assez courtes distances.

- **Le gisement supérieur à ossement de dinosauriens** (Fig. 4) a les mêmes caractéristiques que le précédent: il s'agit également d'une coulée boueuse ayant transporté, accumulé et enfoui rapidement des os peu altérés et des portions de carcasses de grands reptile (Allain et al. 2004).
- **L'installation de nappes d'eau temporaires**, inconnues antérieurement, est indiquée par l'apparition de sédiments fins ou évaporitiques:

- décantation d'argiles plastiques gris vert ou brunes (env. 3 mètres);
- pélites à passées sombres (macération de fins débris végétaux);
- dépôt de gypse sur une épaisseur totale d'environ 6 m. Le faciès initial est un gypse saccharoïde fin, indiquant un dépôt sous-aquatique; la diagenèse a conduit à sa recristallisation plus ou moins large. Vers la base et le sommet, les bancs de gypse sont mêlés de matériel terrigène. Le dépôt a pu s'effectuer dans une dépression endoréique de type chott. L'origine du sulfate n'est pas précisée (lessivage d'évaporites triasique en bordure de l'aire de dépôt?).

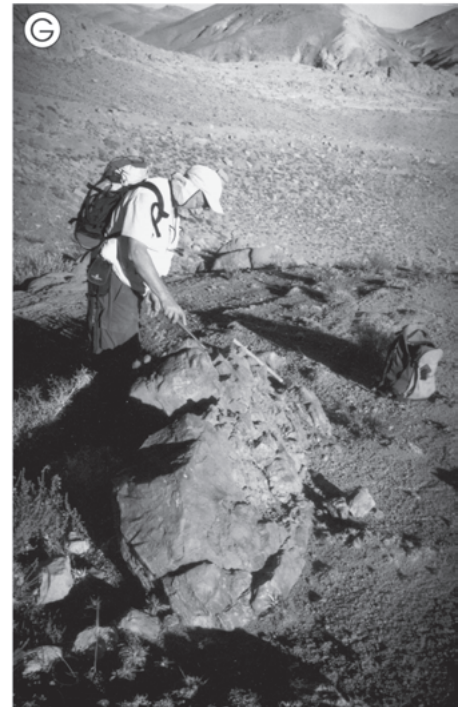
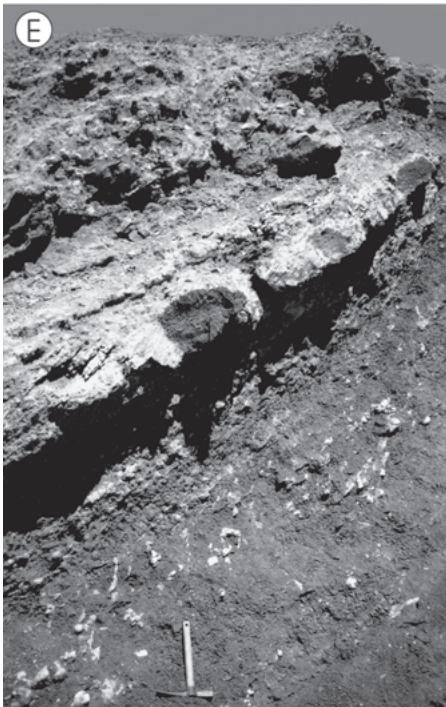
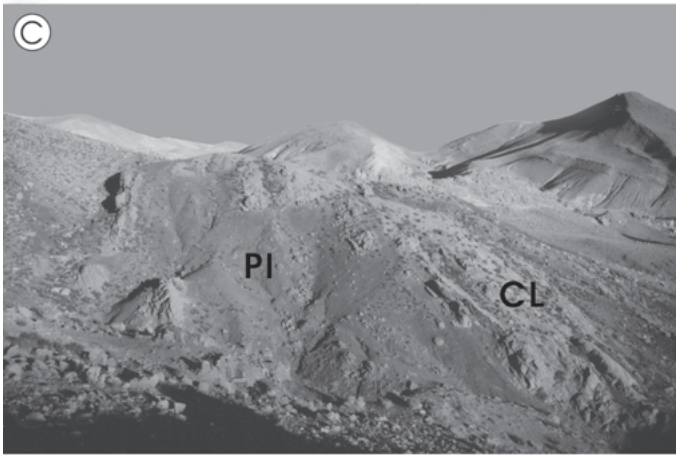
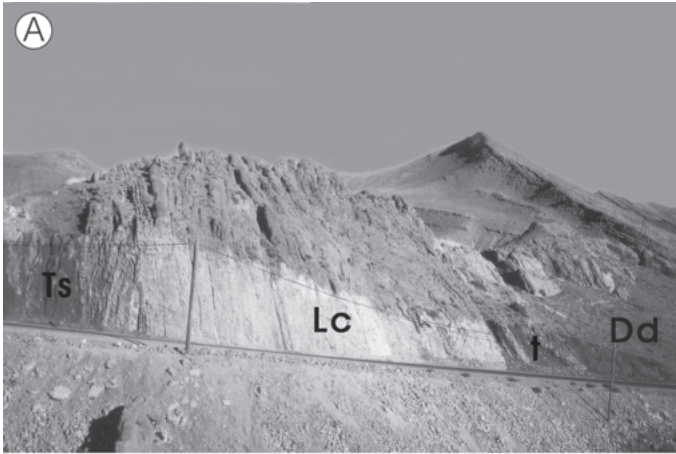
Les pélites brun rouge supportant les couches de gypse montrent sur plusieurs mètres d'épaisseur des nodules de gypse blanc, finement grenu ou recristallisé (≤ 10 cm en moyenne), dispersés dans la masse ou regroupés en horizons discontinus (Fig. 4). Il s'agit de nodules sulfatés d'origine pédologique tels qu'il en existe dans les sols salins des régions sahéliennes. Leur présence indique qu'avant l'installation de la cuvette gypseuse, des eaux sulfatées ont déjà ruisselé en surface et se sont infiltrées dans les sols. Ensuite, lors de phases sèches, l'eau s'évaporant abandonna le gypse qui s'est concentré en nodules dans le sol. Le gypse a pu être ultérieurement transformé en anhydrite de manière précoce (température élevée au niveau du sol) ou lors de diagenèses plus tardives (enfouissement). Le terme H n'a pas été détaillé.

5. Les données paléobiologiques

Les données paléobotaniques

Les caractères sédimentologiques et le contenu paléobotanique des deux niveaux ossifères de la localité de Toudoute sont analogues. Aucun macroreste ligneux n'a été découvert, mais d'assez abondants débris végétaux infra-centimétriques sont dispersés dans le sédiment: il s'agit vraisemblablement de pinnules de fougères, et beaucoup plus rarement de cycadophytes; les épidermes sont généralement conservés (Allain et al. 2004).

L'analyse palynologique de plusieurs échantillons prélevés, ici et là, dans les niveaux ossifères n'a livré aucun palynomorphe; les lames sont encombrées d'innombrables débris végétaux, parmi lesquels on reconnaît des fantômes de trachéïdes. L'analyse palynologique a toutefois permis d'isoler (à partir de la fraction comprise entre 100 micromètres et 1 millimètre) de nombreux débris ligneux provenant probablement de brindilles. Leur examen au M.E.B. a révélé les caractères suivants: bois homoxylé apparemment dépourvu de parenchyme, rayons unisériés uniformément répartis (1 à 8 cellules de hauteur), trachéïdes à ponctuations unisériées de type abiétinéen (parfois très espacées les unes des autres), champs de croisement à oculipores de type picéoïde à ouverture étroite et orientée verticalement; ces caractères permettent d'orienter l'affinité de ce bois, au sein des coniférophytes, vers les Pinacées abiétoïdées ou vers les Taxacées (Boureau 1956).



A l'intérieur de chaque niveau sédimentaire, aucune stratification n'a été observée sur une épaisseur importante (de l'ordre d'un mètre); des graviers épars et non grano-classés, parfois centimétriques, ont été souvent remarqués dans une matrice beaucoup plus finement détritique. L'orientation des pinnules est totalement aléatoire, certaines sont même perpendiculaires aux couches: ce caractère atteste un dépôt rapide, relativement torrentiel, de type coulée boueuse, ce qui est en accord avec les données sédimentologiques exposées plus haut. Il est vraisemblable que les ossements et les débris végétaux proviennent des reliefs environnants, dont la flore était composée de fougères, de cycadophytes et de coniférophytes. L'absence de palynomorphes peut vraisemblablement s'expliquer par le fait que la sédimentation des deux niveaux ossifères ne s'est pas produite pendant la période de dissémination des spores et pollens produits par ces végétaux.

La végétation reconnue n'apporte pas d'information déterminante d'ordre climatique. En particulier, il n'y a pas d'indices botaniques de phases climatiques arides. Ceci n'est pas incompatible avec les données sédimentologiques exposées plus haut, indiquant sans ambiguïté un climat chaud faisant alterner les périodes de précipitation et de sécheresse prolongée. La végétation (fougères apparemment très dominantes) a pu se concentrer dans des zones humides ponctuelles. La fréquence dans les sédiments des fins débris de tufs mentionnés plus haut montre l'existence de points d'eau plus ou moins durables (tufs de sources) susceptibles de maintenir une humidité suffisante en période sèche.

Les données faunistiques

L'association faunique est très peu diversifiée. Il n'a pas été observé de fossiles d'invertébrés continentaux. Le gisement de

vertébrés n'a livré que des ossements de dinosauriens. Ces derniers se rapportent pour la plupart au sauropode *Tazoudasaurus*, quelques-uns appartiennent à un ou deux Théropodes non encore déterminés (Allain et al. 2004). Les restes de sauropodes correspondent à différents individus, jeunes et adultes. Ce sont les fragments de carcasses d'individus d'âges variés qui ont été mêlés dans la coulée boueuse constituant le gisement.

6. Conclusions

Stratigraphie. Le secteur de Toundoute correspond à un élément paléogéographique atypique, situé sur le tracé de l'accident sud-atlasique. La série stratigraphique se prête difficilement à une datation précise. Les dépôts carbonatés attribuables au Lias inférieur y sont plus réduits que nulle part ailleurs (≤ 25 m). En revanche, les influences franchement marines y sont mieux exprimées que dans nombre de séries puissantes proches où les sédiments intertidaux (stromatolithes, mattes algaires) sont souvent très développés (gorges de Dadès par exemple). La fréquence des niveaux de remaniement gravitaire sous-marins (brèches intraformationnelles) est aussi un caractère propre à ce secteur, signalant l'instabilité de l'aire de dépôts. Le passage des carbonates à la série détritique continentale à ossements est continu et rapide. Cette dernière contient une part importante de produits volcanoclastiques (bombes, ponces, sables feldspathiques), ce qui suppose des taux de sédimentation élevés. Ces différentes considérations conduisent à penser que la succession continentale s'est déposée dans un intervalle assez bref appartenant encore au Lias moyen-supérieur, comme on le constate ailleurs dans le Haut-Atlas (Jenny et al. 1980; Monbaron et al. 1985). Les niveaux carbonatés Bajoço-Bathoniens fréquents à l'intérieur du domaine atlasique n'existent pas à Toundoute.

Fig. 5. Illustration des séquences sédimentaires (Lias, Toundoute, Maroc).

Fig. 5. Illustration of the sedimentary sequences (Liassic, Toundoute, Morocco).

A. Substratum des couches continentales de Toundoute: Ts. Pérites rouges fini-triasiques (terme A); Lc. Calcaires et dolomies du Lias inférieur (terme B); t. couches de transition (terme C); Dd. Début des couches volcano-détritiques continentales (terme D).

A. Substratum of the continental Toundoute deposits: Ts. Reddish pelites, Late Triassic (unit A); Lc. Early Liassic carbonates (unit B); t. transitional beds (unit C); Dd. Lower part of the continental volcanoclastic deposits (unit D).

B. Détail de la succession précédente: passage continu et rapide entre les carbonates marins liasiques (Lc) et les dépôts volcanoclastiques (Dd).

B. Detail of the Liassic succession showing the rapid transition between the marine Liassic carbonates (Lc) and the volcanoclastic deposits (Dd).

C. Séquence de dépôt: chenaux à matériel volcano-détritique (CL) et dépôts périto-sableux rubéfiés de plaine d'inondation (PI) incluant des horizons à nodules calcaires pédogénétiques.

C. Depositional sequence: channelized volcanoclastics (CL) and flood-plain deposits (finegrained sands and pelites including pedogenetic carbonate nodules (PI).

D. Vue générale des dépôts continentaux de Toundoute depuis le gisement de dinosauriens (terme G) au douar de Tabia.

D. General view of the continental deposits, from the upper dinosaur site (unit G), douar of Tabia.

E. Niveau à nodules gypseux pédogénétiques surmonté de couches de gypse (terme G).

E. Pedogenetic gypsum nodules and gypsum beds (unit G).

F. Niveau à ossements de dinosauriens (gisement supérieur; terme G) inclus dans une coulée boueuse.

F. Dinosaur site (upper level; unit G); the bones are included in a mud-flow matrix.

G. Bloc de dolomite (faciès carbonaté du Lias inférieur) inclus dans la partie inférieure des couches continentales de Toundoute.

G. Dolomite boulder (Early Liassic carbonate facies) included in the lower part of the continental volcanoclastic deposits of Toundoute.

Volcanisme. Si quelques fragments volcaniques peuvent provenir d'un remaniement de coulées basaltiques triasiques, l'essentiel des produits est homogène, vraisemblablement de nature trachyandésitique. Il s'agit de produits juvéniles, à caractère explosif, de provenance inconnue pour l'instant, mais certainement proche, manifestation précoce du magmatisme d'âge jurassique moyen bien connu dans le Haut-Atlas (Monbaron 1980). Il est possible que les apports chenalisés soient contemporains d'éruptions et en relation avec elles, comme dans le cas de nombreux volcans actuels, sous forme d'écoulements denses (Leyrit & Montenat 2000). Les lits de sable feldspathiques pourraient représenter des dépôts de cendre peu ou pas remaniés. Le secteur de Toundoute appartenant au début du Jurassique à une aire mobile placée sur le tracé de l'accident sud-atlasique, montre des similitudes tectono-sédimentaires et tectono-magmatiques avec le secteur de Tizi-n-Ghachou, situé à l'aplomb de l'accident sud moyen-atlasique, siège également à l'Infra-Lias de manifestations volcaniques explosives (Ouarhache et al 2000).

Paléoenvironnements. Les données sédimentologiques permettent de reconstituer un environnement de type chenaux fluvio-torrentiels – plaine d'inondation. Les conditions climatiques chaudes à périodes alternativement humides et sèches, ont engendré des sols à profils calcaires différenciés (nodules pédogénétiques, caliche). L'accumulation dans les chenaux de matériaux issus des profils de sols calcimorphes (nodules pédogénétiques, pisolithes vadoses et «caliche») témoigne d'une érosion active sur des sols à végétation clairsemée. La fréquence et la constance des débris de travertin également remaniés dans les grès laissent supposer l'existence de vasques naturelles ou de zones humectées par des sources, au voisinage desquelles pouvaient se développer ou persister une végétation plus fournie.

La fraction argileuse des dépôts, à smectite dominante, illite dégradée et interstratifiés illite – smectite est représentative des «sols à montmorillonite» (ou smectite) développés dans les régions à saison sèche marquée. Par l'absence significative de kaolinite, elle se rapproche de la «séquence A» des dépôts atlasiques du Jurassique moyen (Monbaron et al. 1990), qu'elle prolonge vers le bas (Jurassique inférieur). L'apparition de la kaolinite dans les «couches rouges» atlasiques caractérise des dépôts post-Jurassique moyen.

Les niveaux ossifères représentent des épisodes singuliers du point de vue sédimentologique, caractérisés par des écoulements du type coulé boueuse (alors que la plupart des chenaux sont pauvre en matrice). C'est sans doute ce type particulier d'écoulement boueux, en nappe plutôt que chenalisé, qui est responsable de la concentration et de la conservation des ossements et des portions de carcasses, transporté sur de courtes distances dans une matrice boueuse protectrice.

Remerciements

Les auteurs remercient MM. J.P.Billon-Bruyat et C.Meyer pour leurs remarques constructives.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLAIN, R., AOUSBI, N., DEJAX, J., MEYER, C., MONBARON, M., MONTENAT, C., RICHIR, P., ROCHDY, M., RUSSELL, D. & TAQUET, P. 2004: A basal sauropod dinosaur from the Early Jurassic of Morocco. *C. R. Palevol* 3 (3) 199–208.
- BOUREAU, E. 1956: Anatomie végétale. L'appareil végétatif des Phanérogames, tome II, 333–524. Presses Univ. de France.
- FREYET, P. & PLAZIAT, J.C. 1982: Continental Carbonate Sedimentation and Pedogenesis. Late Cretaceous and early Tertiary of Southern France. *Contrib. Sedim.* 12, 213 pp.
- GRADSTEIN, F. M. & OGG, J. G. 2004: Geologic Time Scale 2004 – why, how, and where next? *Lethaia*. 37, 175–181.
- JENNY, J., JENNY-DESHUSSES, C., LE MARREC, A. & TAQUET, P. 1980: Découverte d'ossements de Dinosauriens dans le Jurassique inférieur (Toarcien) du Haut-Atlas central (Maroc), *C. R. Acad. Sci. Paris. D*, 290, 839–842.
- LACHKAR, G., OUARHACHE, D., & CHARRIERE, A. 2000: Nouvelles données palynologiques sur les formations sédimentaires associées aux basaltes triasiques du Moyen Atlas et de la Haute Moulouya (Maroc). *Rev. Micropaléont.* 43/4, 281–299.
- LEYRIT, H. & MONTENAT, C. (Eds.) 2000: *Volcaniclastic Rocks, from Magmas to Sediments*. Gordon & Breach Publisher, London, 265 pp.
- MICHARD, A. 1976: *Éléments de géologie marocaine. Notes et Mémoires, Serv. Géol. Maroc* 420 pp.
- MONBARON, M. 1980: Le magmatisme basique de la région de Tagalft, dans son contexte géologique régional (Haut Atlas central Maroc). *C. R. Acad. Sci. Paris, t. 290, D*, 1337–1340.
- MONBARON, M., DEJAX, J. & DEMATIEU, G. 1985: Longues pistes de dinosaures bipèdes à Adrar-n-Ouglalal (Maroc) et répartition des faunes des grands reptiles dans le domaine atlasique au cours du Mésozoïque. *Bull. Mus. Hist. Nat. Paris* 7, section A, 3, 229–242.
- MONBARON, M., KUBLER, B. & ZWEIDLER, D. 1990: Detrital rubefied sedimentation in the High Atlas Trough in the Mesozoic: attempt of lateral correlations using correspondence factor analysis. *J. Afr. Earth Sci.* 10/1–2, 369–384.
- OUARHACHE, D., CHARRIERE, A., CHALOT-PRAT, F. & EL WARTITI, M. 2000: Sédimentation détritique continentale synchrone d'un volcanisme explosif dans le Trias terminal à Infra-Lias du domaine atlasique (Haute Moulouya, Maroc). *J. Afr. Earth Sci.* 31, 3–4, 555–570.
- PIQUE, A. 1994: *Géologie du Maroc*, PUMG édit., 284 pp.
- PIQUE, A. & BOUABDELLI, M. 2000: *Histoire géologique du Maroc. Découverte et itinéraires. Notes et Mémoires, Serv. Géol. Maroc* 409, 115 pp.
- ROCH, E. (1950): *Histoire stratigraphique du Maroc, Notes et Mémoires, Serv. Géol. Maroc* 80, 1–438.
- SERVICE GEOLOGIQUE DU MAROC (Edit.) 1985: *Carte géologique du Maroc à 1/1.000.000 e. Notes et Mémoires* 260, Serv. Géol. Maroc.

Manuscrit reçu le 16 juillet 2004

Révision acceptée le 17 mars 2005

Published Online First November 25, 2005