



Disponible en ligne sur
ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
www.em-consulte.com



Article original

Deux nouveaux sites à traces de pas dinosauroïdes dans la Formation Dolomitique de l'Hettangien de Lozère, Languedoc-Roussillon, France

Two new dinosaur tracksites from the Hettangian Dolomitic Formation of Lozère, Languedoc-Roussillon, France

Jean-David Moreau^{a,*}, Vincent Trincal^b, Georges Gand^c, Didier Néraudeau^a, Guillaume Bessière^d, Benjamin Bourel^d

^a CNRS UMR 6118, laboratoire de paléontologie, Géosciences, université de Rennes 1, Campus de Beaulieu bâtiment 15, 263, avenue du Général-Leclerc, 35042 Rennes, France

^b UMR 6249, laboratoire Chrono-environnement, université de Franche Comté, 16, route de Gray, 25030 Besançon, France

^c UMR CNRS/UB 6282, laboratoire Biogéosciences, université de Bourgogne, 6, boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

^d Association Paléontologique des Hauts Plateaux du Languedoc, 14, chemin des Écureuils, 48000 Mende, France



INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 19 février 2014

Accepté le 27 avril 2014

Disponible sur Internet le 7 juin 2014

Mots clés :

Empreintes de dinosaures

Théropodes

Ichnologie

Hettangien

Jurassique inférieur

Bassin des Causses

Sud de la France

RÉSUMÉ

Les récentes études ichnologiques menées dans le Bassin des Causses ont mis à jour deux nouveaux gîtes à empreintes de pas de dinosaures inédits dans la Formation Dolomitique de l'Hettangien. Ces sites sont situés dans la partie nord du Bassin, en Lozère, un secteur où les empreintes dinosauroïdes infraliasiques étaient peu documentées. Les dalles à ichnites sont remarquables par le grand nombre et la diversité des traces. Les empreintes ont été attribuées à *Grallator* (Hitchcock, 1858), *Dilophosauripus* (Welles, 1971) et *Eubrontes* (Hitchcock, 1845) dont les ichnopoïètes étaient des théropodes. Bien que de nombreux sites aient été mis à jour dans le Bassin des Causses ces dernières décennies, un assemblage ichnologique associant ces trois ichnotaxons n'avait jamais été décrit dans la Formation Dolomitique.

© 2014 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

ABSTRACT

Recent ichnological studies revealed two new localities showing dinosaur footprints in the Hettangian Dolomitic Formation from the Causses Basin, southern France. The traces are reported from the northern part of the basin, in Lozère, an area where Lower Jurassic dinosaur ichnites were poorly documented. The surfaces bearing footprints are characterized by a large number of traces. The ichnites are ascribed to *Grallator* (Hitchcock, 1858), *Dilophosauripus* (Welles, 1971) and *Eubrontes* (Hitchcock, 1845) whose trackmakers were theropods. Although numerous tracksites were previously described in the southern part of the Causses Basin, these three ichnotaxa are for the first time observed in association into the Dolomitic Formation.

© 2014 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Keywords:
Dinosaur footprints
Theropoda
Ichnology
Hettangian
Lower Jurassic
Causses Basin
Southern France

1. Introduction

La Formation des Grès et Argilites bariolées et la Formation Dolomitique de l'Hettangien du Bassin des Causses ont livré un grand nombre d'empreintes de pas de dinosaures (Thaler, 1962; Ellenberger, 1988; Demathieu, 1990, 1993; Demathieu et Sciau, 1999; Demathieu et al., 2002; Sciau, 2003; Gand et al., 2007;

* Auteur correspondant. European Synchrotron Radiation Facility, 6, rue J.-Horowitz, BP 220, 38043 Grenoble cedex, France.
Adresse e-mail : jean.david.moreau@gmail.com (J.-D. Moreau).

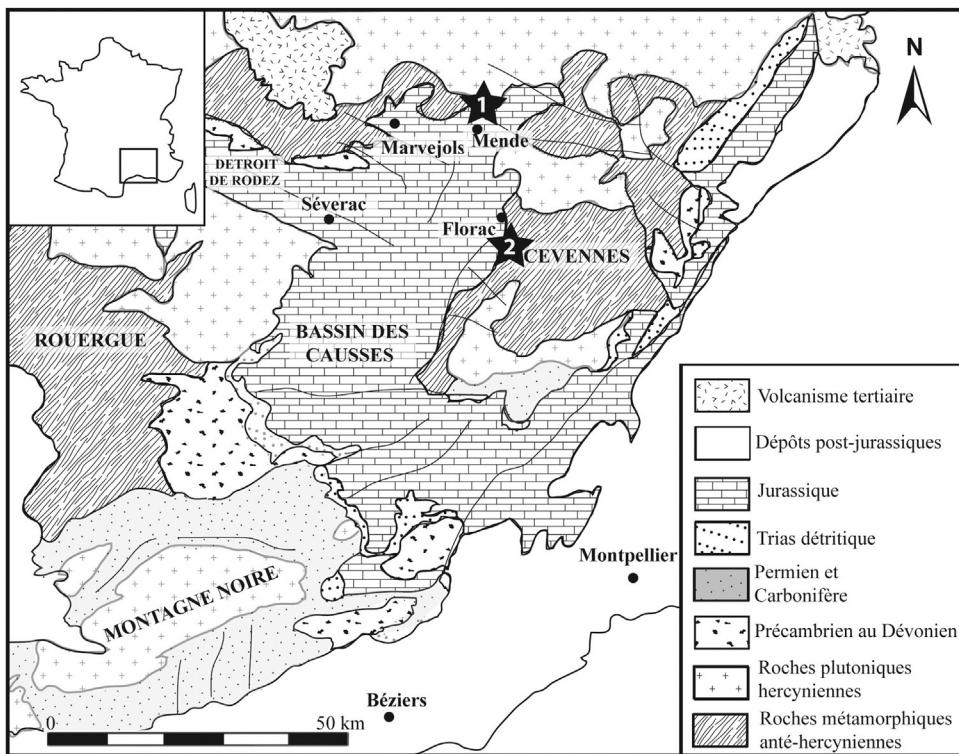


Fig. 1. Localisation des deux gîtes à empreintes sur la carte géologique simplifiée du Bassin des Causses ; 1, Mende ; 2, Solférière.

Location of the two tracksites on the geological map of the Causses Basin; 1, Mende; 2, Solférière.

Modifiée à partir de Moreau et al., 2012b.

Moreau, 2011; Moreau et al., 2012a,b). L'étude de ces traces est d'un grand intérêt car les restes osseux de dinosaures sont très peu documentés dans le Lias européen, notamment dans le Bassin des Causses où aucun ossement n'a été trouvé (Allain et Suberbiola, 2003; Weishampel et al., 2004). En revanche, la France comporte de nombreux sites à empreintes de pas de vertébrés dans l'intervalle Trias-Hettangien (Demathieu et Gand, 2003a,b). Celles, découvertes majoritairement dans l'Aveyron, le Gard, l'Hérault ou encore en Lozère sont, actuellement, le seul témoignage du passage de ces dinosaures dans cette région du sud de la France. Les prospections menées ces dernières années ont entraîné la découverte de nombreux gîtes surtout localisés sur la bordure ouest du Bassin des Causses (Demathieu et al., 2002; Sciau, 2003). Dans sa partie septentrionale, les traces restent peu documentées dans la Formation Dolomitique. Ainsi le site de Saint-Laurent-de-Trèves est resté unique dans ce secteur pendant de nombreuses années (Monod, 1935; Thaler, 1962; Demathieu, 1990). En Lozère, la découverte de deux surfaces inédites, à nombreuses empreintes de pieds tridactyles, généralise leur présence dans le nord-est des Causses. Après leur caractérisation morphologique et biométrique, celles-ci seront comparées aux ichnites déjà décrites dans l'Hettangien caussenard et vendéen (Demathieu et al., 2002; Demathieu, 2003; Gand et al., 2007).

2. Localisations géographique et géologique

Les traces de pas ont été découvertes dans deux localités, dans le département de la Lozère (Languedoc-Roussillon, France) (Fig. 1). Le premier site est situé sur la bordure exposée au sud-est du Causse d'Auge, près de Mende. Le second se trouve dans la « zone centrale » du Parc National des Cévennes (PNC), sur le plateau de « la Can de l'Hospitalet », à moins de 10 km au sud de Florac, à proximité du col

de Solférière. Cette seconde localité est géographiquement proche du gîte de Saint-Laurent-de-Trèves signalé par Monod (1935).

Situé au sud du Massif Central (Fig. 1), le Bassin des Causses s'étend, dans sa partie nord, du Détroit de Rodez à l'ouest à celui du Bleymard, à l'est. Les premiers dépôts sédimentaires mésozoïques, d'âge Rhétien-Hettangien ou Hettangien, reposent en discordance sur un socle cristallin antéhercynien à hercynien (Briand et al., 1979). Ils constituent la Formation des Grès et Argilites bariolées qui a d'abord été datée du Rhétien (Briand et al., 1979, 1993). À partir d'études palynologiques, Grigniac et Taugourdeau-Lantz (1982) et Taugourdeau-Lantz (1983) ont montré que ces conglomérats sont diachrones et qu'ils peuvent être datés de l'Hettangien dans la bordure nord du Bassin des Causses. La Formation des Grès et Argilites bariolées est généralement composée d'épais corps gréseux ou conglomératiques chenalés, alternant avec des niveaux d'argilites bariolées (Simon-Coinçon, 1989). Elle est particulièrement bien visible dans le Détroit de Rodez, mais elle est très réduite, voire absente dans certaines localités lozériennes (Brouder et al., 1977). Dans le secteur de Mende, de rares empreintes de plantes « possiblement » attribuées à *Equisetites* et *Otozamites* ont été signalées dans cette formation (Briand et al., 1979).

La Formation Dolomitique est caractérisée par des dolomies et des calcaires argileux pouvant s'organiser en fines plaquettes ou en bancs massifs, alternant avec des niveaux d'argilites vertes, centimétriques à décimétriques. Des rides de courant et des fentes de dessiccation sont souvent observées dans cette unité ainsi que plus rarement des pseudomorphoses d'halite. Des dômes stromatolithiques ont également été observés dans l'Aveyron (Demathieu et al., 2002) et en Lozère (Moreau, 2011). Les niveaux argileux sont parfois riches en lignite et peuvent contenir des rameaux feuillés de conifères (e.g. *Pagiophyllum peregrinum*, *Brachiphyllum paparelii* et *Hirmeriella airelensis*; Thévenard, 1993).

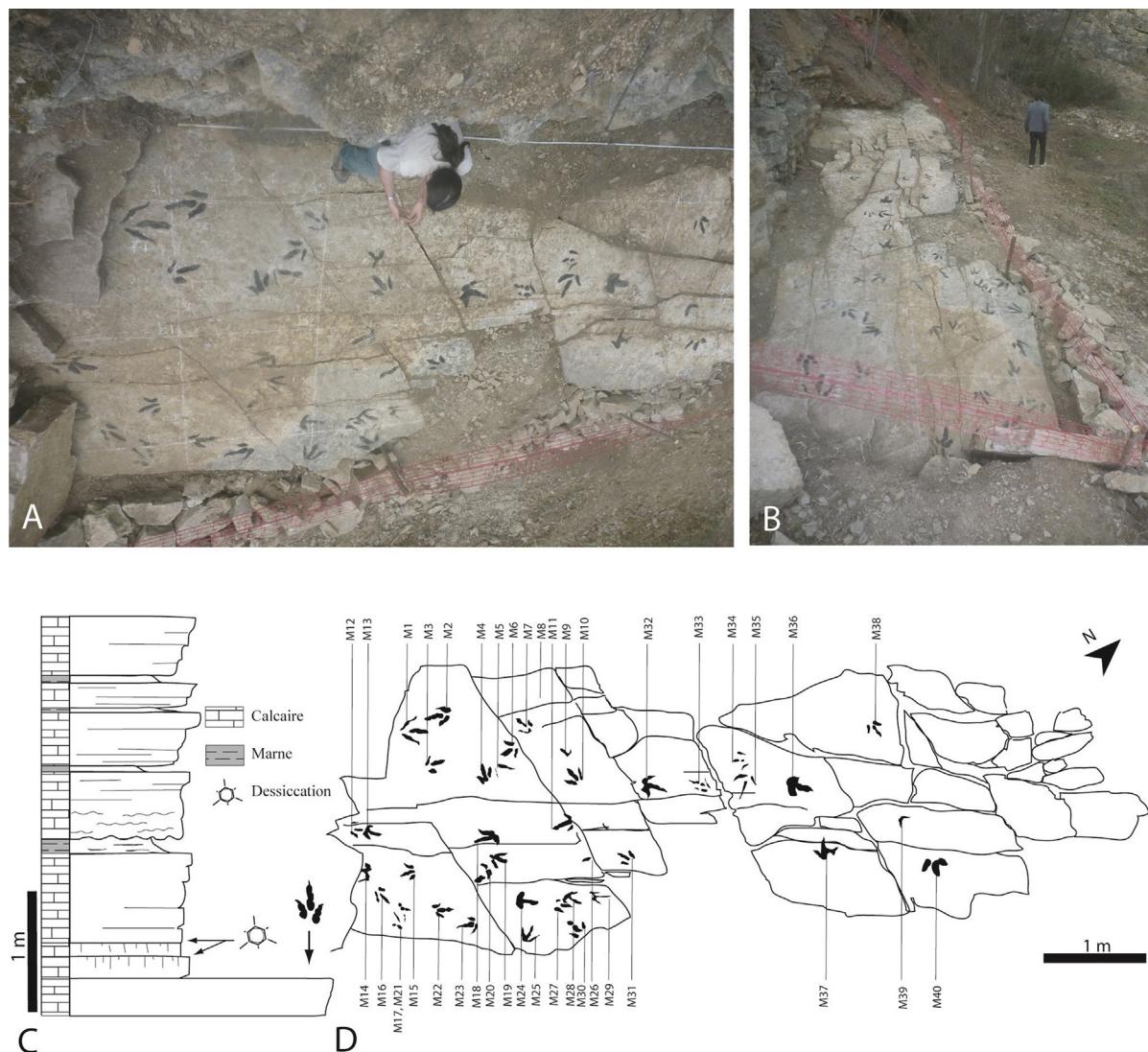


Fig. 2. La dalle à empreintes de Mende. A–B. Dalle calcaire porteuse des traces (ici surlignées provisoirement avec du charbon). C. Coupe stratigraphique. D. Schéma de la dalle et situation des empreintes.

Tracksite of Mende. A–B. Limestone slab bearing footprints (highlighted with coal). C. Stratigraphic cross-section. D. Interpretative sketch with the location of ichnites.

En Lozère, les fossiles sont rares dans la Formation Dolomitique, hormis les restes de végétaux et les ichnofossiles. Quelques lamellibranches (e.g. *Cardinia concinna*, *Liostrea* sp., *Ostrea irregularis*) et des moulages internes de gastéropodes non identifiables ont été signalés dans les secteurs de Meyrueis, de Florac et de Mende (Brouder et al., 1977; Briand et al., 1979; Gèze et al., 1980). Quelques ammonites ont également été observées sur la Can de l'Hospitalet (e.g. *Psiloceras planorbis*; Brouder et al., 1977), confirmant l'âge Hettangien de l'encaissant. Les empreintes de pas de dinosaures de Solprière et de Mende décrites dans cet article ont été trouvées à la surface de bancs calcaires et/ou dolomitiques pluridécimétriques de la Formation Dolomitique.

3. Étude paléontologique

3.1. Les interfaces à traces de pas

La dalle à empreintes de Solprière fut révélée par Michel Moreau à la suite de travaux routiers dans les années 1980–1990 ; celle de Mende le fut par l'un d'entre nous (J.-D.M.) en 2009 à la suite de prospections. Jusqu'en 2013, seule une trace tridactyle complète

ainsi que 3 autres partielles étaient visibles sur le site de Mende. Depuis, le chantier de fouilles mis en œuvre par l'Association Paléontologique des Hauts Plateaux du Languedoc (APHPL) a révélé tout le potentiel du gisement. Les deux sites fossilières ont une particularité commune. Bien qu'ayant une surface réduite, ils sont porteurs d'un grand nombre de traces de pas (Fig. 2 et 3). La dalle de Mende montre ainsi 40 traces pour une superficie de 17 m² ; celle de Solprière présente 26 ichnites sur un peu moins de 8 m². Actuellement, aucune piste n'a été remarquée. Toutes les traces de pas sont tridactyles. Elles sont préservées de façon hétérogène avec pour les plus nettes les marques des coussinets digitaux et des griffes.

Nous avons étudié ces nouvelles empreintes à partir des caractères morphologiques et biométriques utilisés par Demathieu et al. (2002) pour les ichnotaxons caussenards (Fig. 4). Des intervalles de confiances ont été calculés, au seuil de 5 %, sur les valeurs moyennes de ces caractères. Les mesures ont permis de comparer les traces de Mende et de Solprière entre elles, puis avec le matériel ichnologique de référence dans les Causses (Demathieu et al., 2002), et enfin avec les formes de l'Hettangien du site du Veillon, en Vendée (Demathieu, 2003; Montenat et Bessonat, 2003; Gand et al., 2007).

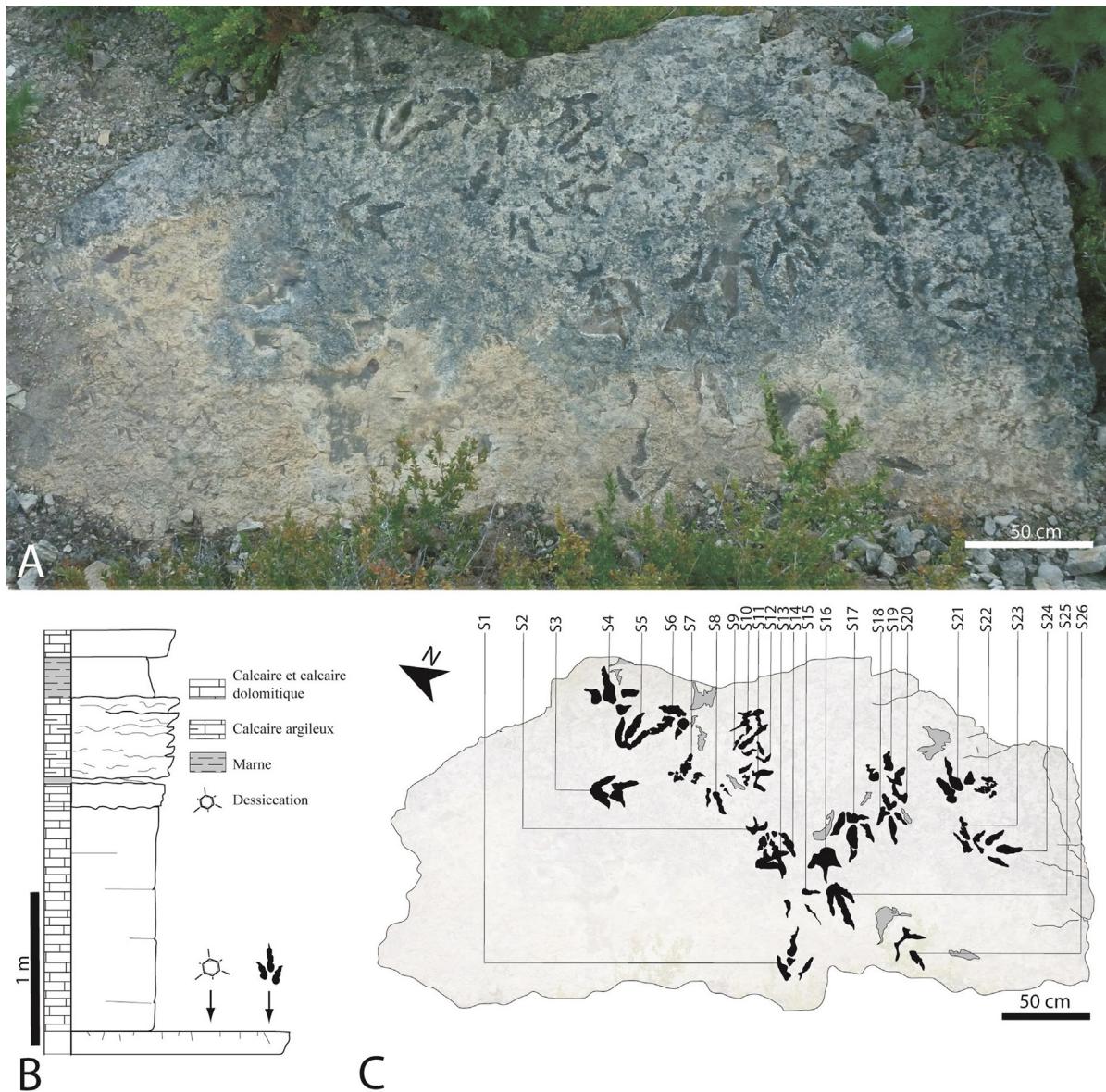


Fig. 3. La dalle à empreintes de Solpérière. A. Dalle calcaire porteuse des empreintes. B. Coupe stratigraphique. C. Schéma de la dalle et situation des empreintes.
Tracksite of Solpérière. A. Limestone slab bearing footprints. B. Stratigraphic cross-section. C. Interpretative sketch with the location of ichnites.

3.2. Description et nomenclature des ichnites

Trois morphotypes ont été distingués à Solpérière et à Mende. Le premier est caractérisé par des traces digitales fines et nettement individualisées, dont les longueurs sont comprises entre 13,0 et 29,5 cm. Elles sont plus longues que larges avec un rapport L/W' compris entre 1,15 et 1,65. La trace du doigt médian est allongée et celle du IV est plus longue que pour le II. Les empreintes des coussinets ou pelotes phalangéales sont nettes et globuleuses. Le coussinet digito-métatarsien IV est souvent observé, en position plus proximale que celui du II. L'angle séparant les orteils II–IV est assez réduit ($T = 46^\circ$ en moyenne). Ces différentes caractéristiques permettent d'attribuer ce premier morphotype à l'ichnogenre *Grallator* (Hitchcock, 1858) *sensu* Lapparent et Montenat (1967) (Demathieu et al., 2002). Il est représenté par 7 traces sur la dalle de Mende et par 10 sur celle de Solpérière (respectivement M2, M4, M16, M22, M29, M31, M33 puis S1, S5, S8, S11, S12, S13, S18, S21, S23, 25 ; Fig. 5–7).

Le second morphotype est caractérisé par des traces aussi longues que larges avec un rapport L/W' proche de 1. Certaines d'entre elles sont même plus larges que longues. La longueur totale L est comprise entre 17,5 cm et 27,0 cm et celles des empreintes digitales II et IV sont similaires. Les extrémités distales des traces digitales peuvent être assez effilées. Les coussinets sont peu ou pas marqués et l'angle T est compris entre 50° et 91° . Ces caractéristiques permettent d'attribuer ces ichnites à l'ichnotaxon *Dilophosauripus* (Welles, 1971). Cet ichnogenre est largement représenté au sein de l'assemblage ichnologique de la dalle de Mende, avec 13 empreintes, et de celle de Solpérière avec 5 empreintes (respectivement, M6, M10, M15, M17, M23, M25, M30, M32, M34, M35, M37, M38, M40 puis S7, S16, S20, S26, S24 ; Fig. 5–7).

Le troisième morphotype est représenté par deux traces de grande taille, M1 et S17, respectivement longues de 33 et 31 cm. Leur angle T est respectivement égal à 45° et à 70° . S17 montre des traces digitales larges et trapues, la base de l'orteil IV occupe

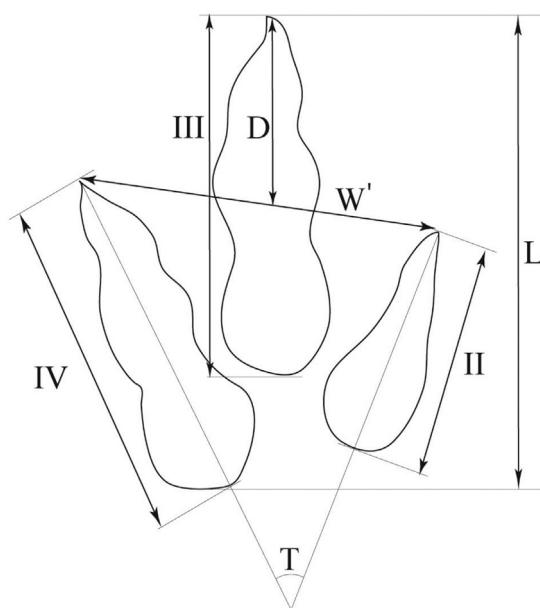


Fig. 4. Caractères mesurés sur une traces tridactyle. Il s'agit de la longueur de la trace, L; la largeur de la trace, W'; les longueurs des trois traces digitales II, III puis IV; le dépassement de la trace digitale III sur les deux latérales, D; et de l'angle divergeant entre II et IV, T.

Biometric measurements performed on tridactyl footprints. Length of the trace, L; width of the trace: W'; digits lengths, II, III, IV, lengths of the free part III, D; angle between II-IV, T.

Figure tirée de Moreau et al., 2012a.

une position plus proximale que celle du II. Les traces digitales de M1 sont étroites. Cet aspect peut s'expliquer par la rétractation précoce de la boue (phénomène de thixotropie). Les longueurs digitales II et IV de M1 et S17 sont grandes par rapport à celle du III. Parmi les ichnogénres précédemment décrits dans les Causses (Demathieu et al., 2002), le seul qui combine des longueurs de traces supérieures à 30 cm et des valeurs de T supérieures à 40° est *Eubrontes* (Hitchcock, 1845) *sensu* Olsen et al. (1998) (Fig. 5-7).

Les orientations des traces de Mende et de Solprière sont illustrées sur la Fig. 8. Celles de Mende s'orientent préférentiellement selon un axe NE-SO à SSO. Celles de Solprière suivent des orientations majoritairement ENE-OSO et SSE-NO.

3.3. Comparaison avec les traces de pas hettango-sinémuriennes du Bassin des Causses et hettangiennes de Vendée

Demathieu et al. (2002) ont défini trois espaces biométriques à partir de la longueur totale L et du rapport (L-D)/D des traces des Causses (Fig. 9A). Le groupe I contient *Grallator variabilis* Lapparent et Montenat, 1967 et *G. saucierensis* Demathieu et Sciau, 1992; le groupe II, *G. lescurei* Demathieu, 1990, *G. minusculus* Hitchcock, 1858 et *Dilophosauripus williamsi* Welles, 1971; puis le groupe III, *Eubrontes giganteus* Hitchcock, 1845. La Fig. 9A montre que les petites formes *G. variabilis* du groupe I, observées dans le sud du Bassin des Causses (Demathieu et al., 2002), mais aussi en Vendée (Demathieu, 2003), sont absentes sur les niveaux de Mende et de Solprière au nord. Les empreintes de ces deux localités lozériennes sont situées dans l'espace du groupe II. Il est à noter que certaines traces sont localisées à la limite des groupes II et III. *Grallator*

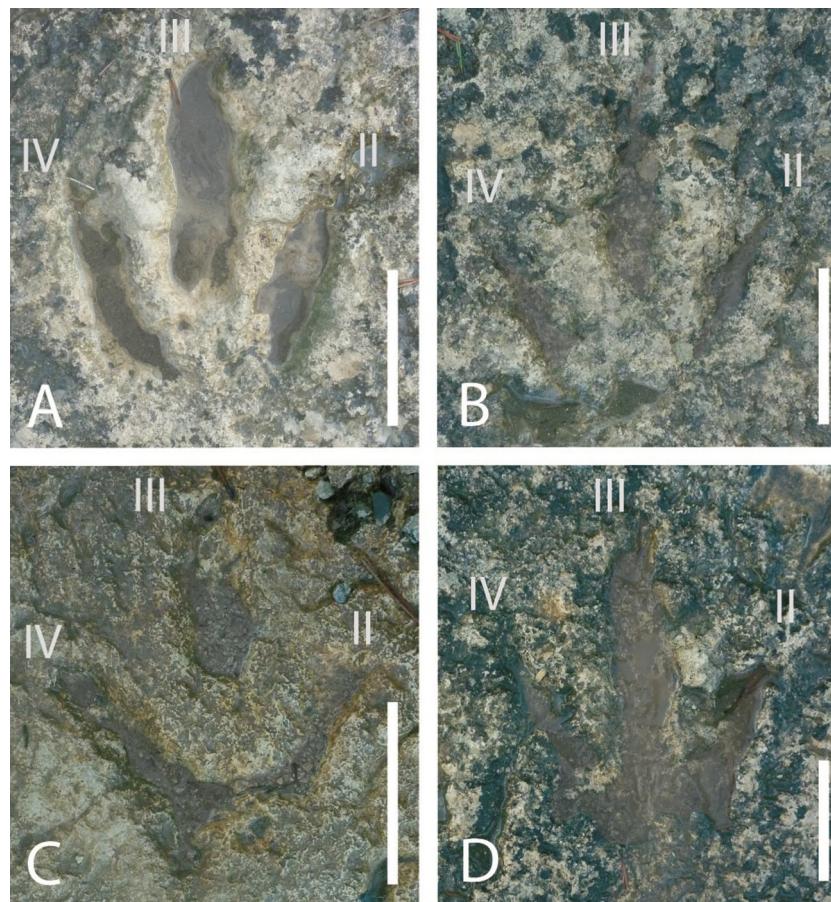


Fig. 5. Empreintes tridactyles. A. S5 (*Grallator* sp.). B. S24 (*Dilophosauripus* sp.). C. S26 (*Dilophosauripus* sp.); S17 (*Eubrontes* sp.). Barre d'échelle, 10 cm.
Tridactyl footprints. A. S5 (*Grallator* sp.). B. S24 (*Dilophosauripus* sp.). C. S26 (*Dilophosauripus* sp.); S17 (*Eubrontes* sp.). Scale bar, 10 cm.

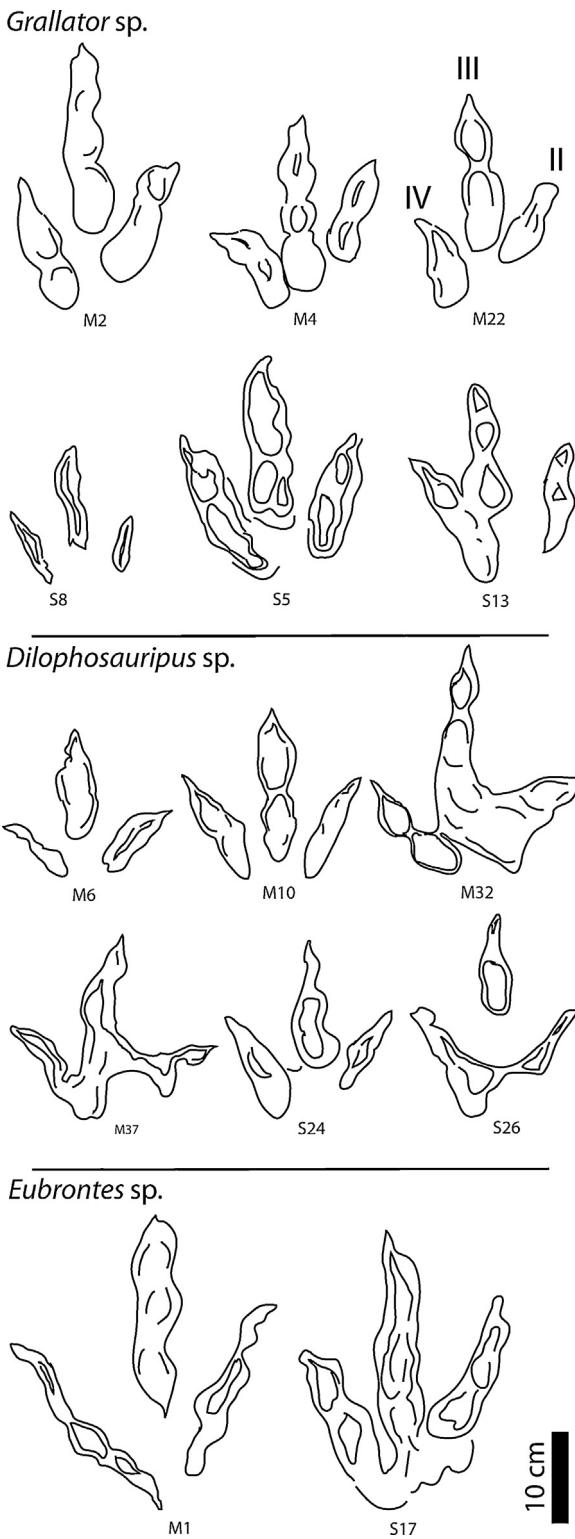


Fig. 6. Schémas des trois différents ichnogenres rencontrés sur les sites de Mende et Solférière. Traces digitales II, III et IV de droite à gauche.
Sketch of the three different ichnogenus from Mende and Solférière. Digital traces II, III, and IV from right to left.

et *Dilophosauripus* de Mende et de Solférière occupent un espace biométrique commun. Deux ichnoespèces de *Grallator* de grandes dimensions ont été décrites dans les Causses. Il s'agit de *G. leiscurei* et de *G. minusculus* (Demathieu et al., 2002). Ces deux ichnotaxons ont précédemment été signalés non loin du gîte de Solférière, à

Saint-Laurent-de-Trèves et au Pompidou (Demathieu et al., 2002; Sciau, 2003). Demathieu (1993) précise, à ce propos, que *G. minusculus* peut atteindre une longueur de 30 cm. Demathieu (2003) avait noté d'importantes similitudes entre les ichnopopulations *G. minusculus* des Causses et *G. maximus* de Vendée ($L = 23,5$ cm de moyenne), proposant qu'il s'agissait finalement d'une seule et même ichnoespèce.

Le diagramme bivarié présentant L/W' par rapport à T (Fig. 9B) met nettement en évidence deux espaces biométriques distincts entre *Dilophosauripus* et *Grallator*. Cette distinction est due à un angle T plus petit pour *Grallator* et un rapport L/W' qui est moins important chez *Dilophosauripus*. Les longueurs moyennes des *Grallator* de Mende et de Solférière sont respectivement de 23 cm et de 21,7 cm (Fig. 7). Celles-ci sont proches de celle retenue par Demathieu et al. (2002) pour le *G. leiscurei* (c. 25,5 cm de moyenne; Fig. 7) contrairement à celle de *G. minusculus* qui est légèrement plus élevée (c. 29,4 cm de moyenne; Fig. 7). Les valeurs moyennes de T des empreintes des deux gîtes caussenards sont identiques (c. 46° de moyenne) et également proches de celle de *G. leiscurei* (c. 51°; Demathieu et al., 2002; Fig. 7). Cependant, à Solférière, un *Grallator* montre un T de 65°. Cette haute valeur est généralement rencontrée chez *Dilophosauripus*, cependant la projection du doigt III ne permet pas de l'inclure dans cet ichnogenre.

Les *Dilophosauripus* observés à Mende et à Solférière montrent des valeurs de T très grandes (c. 50°–91°). Bien que Demathieu et al. (2002) aient retenu une valeur moyenne de T de 54° pour cet ichnotaxon (Fig. 7), Sciau (2003) mentionna une contre-empreinte isolée « possiblement » attribuée à l'ichnogenre *Dilophosauripus* et dont la valeur de T est de 72°. Plus récemment, l'étude d'une dalle à ichnites découverte dans la Formation des Grès et Argillites bariolées du Détriot de Rodez a livré des spécimens de *D. williamsi* dont T atteint 79° (Moreau et al., 2012a). D'autre part, Moreau et al. (2012b) mentionnent des valeurs pouvant atteindre 98° dans la Formation Dolomitique, à Gatuizières. Contrairement à *Grallator*, notons que *Dilophosauripus* n'est pas décrit dans les dépôts het-tangiens de Vendée.

Les *Eubrontes* décrits dans les Causses et en Vendée semblent montrer des caractéristiques morphologiques et biométriques très proches (Lockley et Meyer, 1999; Gand et al., 2007). Cet ichnogenre peut atteindre des dimensions très importantes (Demathieu et Sciau, 1999; Demathieu et al., 2002; Demathieu, 2003). Ceci est particulièrement avéré en Aveyron où *E. giganteus* a une longueur de 38,9 cm en moyenne (Fig. 7). Néanmoins, *Eubrontes* en Lozère est de taille plus réduite (c. 31 et 33 cm), ce qui explique qu'il soit tangent aux groupes II et III (Fig. 9A). Des tailles plus petites, voisines de 27 cm, ont été décrites dans l'Hettangien du Détriot de Rodez, aux environs d'Espalion (Moreau et al., 2012a). Bien que leurs longueurs totales puissent être semblables, *E. giganteus* se distingue de *G. minusculus* par un angle T pouvant être supérieur à 40° et une valeur du rapport L/W' qui est plus réduite (1,24 pour *E. giganteus* et 1,58 pour *G. minusculus*; Demathieu et al., 2002; Fig. 7).

Malgré le faible nombre d'ichnites attribuées à *Eubrontes* à Mende et Solférière, celles-ci, comme celles du Détriot de Rodez, induisent que cet ichnotaxon peut avoir des dimensions réduites. Leurs longueurs restent néanmoins supérieures à 25 cm, valeur minimale donnée par Olsen et al. (1998) pour *Eubrontes* de l'Hettangien du Connecticut (États-Unis). À la lueur du grand nombre de gîtes et de traces connues dans le sud-ouest caussenard, il semble que cette tendance à une réduction de la taille d'*Eubrontes* soit localisée dans la partie nord du Bassin des Causses. Similairement, les petites formes de *Grallator* (e.g. *G. variabilis*, *G. saulierensis*), fréquentes dans la bordure occidentale du Bassin des Causses (Demathieu et al., 2002; Sciau, 2003) semblent plus rares dans sa partie septentrionale. Précisons que les trois ichnogenres *Grallator*, *Dilophosauripus* et *Eubrontes* décrits dans ce travail n'avaient encore jamais été observés en association dans la

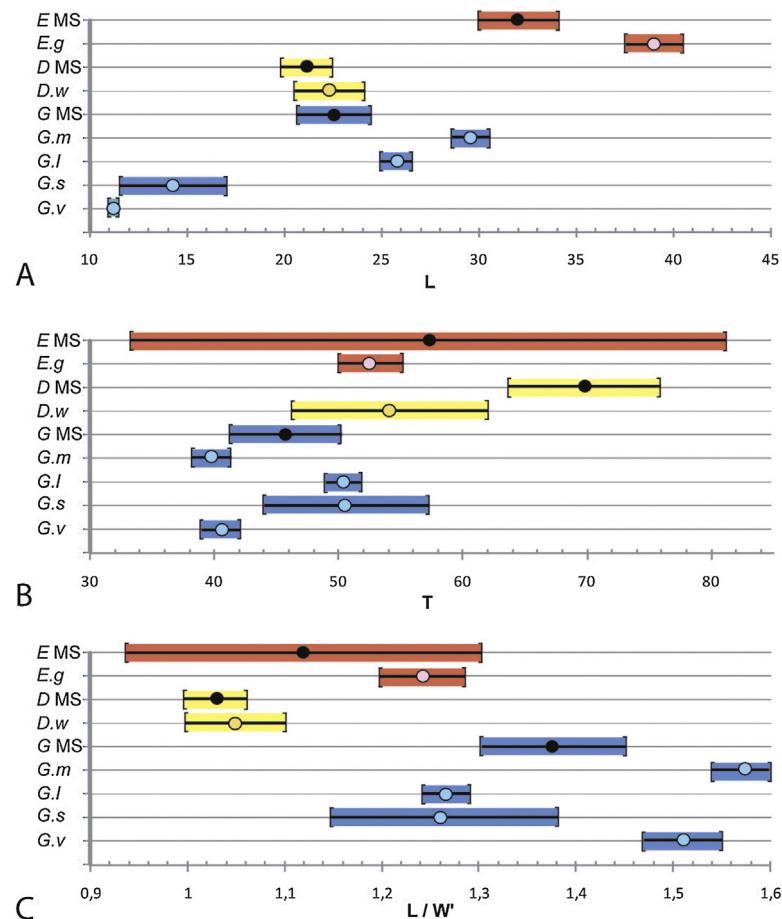


Fig. 7. Moyennes et intervalles de confiance (au seuil de 5 %) pour L, T et L/W' des traces de Mende et Solprière, puis celles de référence pour les Causses (Demathieu et al., 2002). A. L en cm. B. T en degrés. C. L/W'. Les points indiquent les valeurs moyennes, les crochets indiquent les bornes inférieures puis supérieures des intervalles de confiance. G.v : *Grallator variabilis*; G.s : *Grallator saucieri*; G.I : *Grallator lescurei*; G.m : *Grallator minusculus*; G MS : *Grallator* sp. de Mende et Solprière; D.w : *Dilophosaurus williamsi*; D MS : *Dilophosaurus* sp. de Mende et Solprière; E.g : *Eubrontes giganteus*; E MS : *Eubrontes* sp. de Mende et Solprière.

Average with confidence intervals (5%) of L, T and L/W' for Mende and Solprière traces, and reference traces from the Causses (Demathieu et al., 2002). A. L in cm. B. T in degrees. C. L/W'. Dots indicate the average values, brackets indicate the lowest and highest values of confidence intervals. G.v: *Grallator variabilis*; G.s: *Grallator saucieri*; G.I: *Grallator lescurei*; G.m: *Grallator minusculus*; G MS: *Grallator* sp. from Mende and Solprière; D.w: *Dilophosaurus williamsi*; D MS: *Dilophosaurus* sp. from Mende and Solprière; E.g: *Eubrontes giganteus*; E MS: *Eubrontes* sp. from Mende and Solprière.

Formation Dolomitique. En revanche, cet assemblage a été retrouvé dans la Formation des Grès et Argillites bariolées du Détriot de Rodez (Moreau et al., 2012a). À l'échelle du bassin, il n'est pas à exclure que cette variation spatiale de la distribution des ichnotaxons soit le reflet d'une occupation différente des territoires caussenards en fonction des communautés de dinosaures.

3.4. Les ichnopoïètes probables et leur paléoenvironnement

Toutes les traces de pas sont tridactyles et montrent les mêmes formules phalangiennes de type 3, 4 et 5, respectivement pour les orteils II, III et IV. Cette architecture ostéologique déduite correspond à celle des dinosaures théropodes, bien différente de

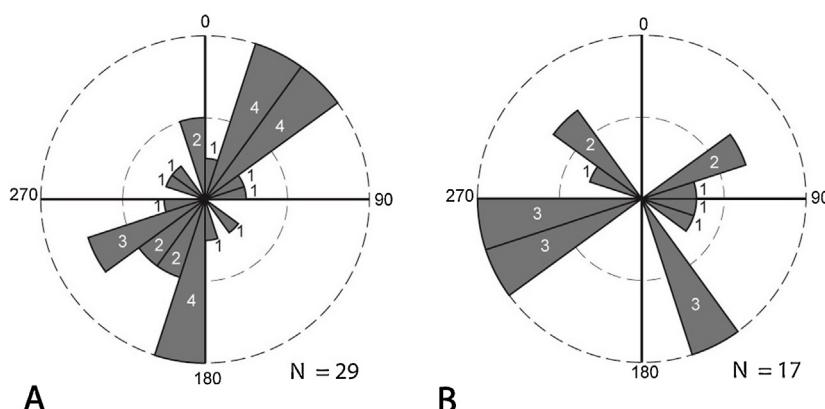


Fig. 8. Orientations des empreintes. A. Dalle de Mende. B. Dalle de Solprière.
Footprints directions. A. Mende tracksite. B. Solprière tracksite.

celle des ornithopodes. Cette attribution à des Saurischiens est aussi confirmée par Demathieu et al. (2002) qui ont proposé de prendre en compte la valeur maximale 2,75 pour le rapport ($L-D$)/ D des structures pédieuses des théropodes. Ainsi, il apparaît que le grand nombre de traces tridactyles imprimées sur les dalles de Mende et de Solprière sont issues de dinosaures bipèdes et carnivores. Durant le Jurassique inférieur, ces théropodes étaient représentés par les Coelophysidae et les Ceratosauridae en Afrique du Sud et en Amazonie (Weishampel et al., 2004). En France, les restes de théropodes hettangiens sont très rares, mais illustrés en Normandie par *Liliensternus airelensis* (Allain et Suberbiola, 2003).

Le grand nombre et la diversité des traces imprimées sur les dalles de Mende et de Solprière prétendent de l'existence de zones propices aux passages récurrents. En effet, il peut aisément être conçu que certaines zones du Bassin des Causses étaient ponctuellement voire saisonnièrement traversées par les dinosaures. La raison de la présence des théropodes dans ce secteur de la bordure téthysienne n'est pas encore élucidée. L'absence de traces d'autres dinosaures tels que les Sauropodes reste énigmatique et aucun lieu de ponte n'a encore été mis à jour. L'étude sur l'orientation des traces (Fig. 8) a révélé la présence de deux axes de déplacement préférentiels, globalement perpendiculaires. Ce constat a déjà été fait dans la partie méridionale des Causses où Demathieu et al. (2002) suggèrent que les théropodes se déplaçaient majoritairement selon les grands axes du bassin N-S et E-O. Des rides de courant ont été observées à proximité de la dalle à empreintes de Mende, leur orientation sous-entend que le paléorivage local suivait un axe globalement N120–N150. Nous ne pouvons pas exclure que les dinosaures longeaient ou traversaient la côte.

La Formation des Grès et Argilites bariolées de l'Hettangien inférieur correspond à des dépôts fluvio-torrentiels continentaux alimentés par des apports détritiques issus de l'altération des derniers reliefs hercyniens et antéhercyniens (Perrissol, 1990; Lopez, 1992; Hamon, 2004). Les niveaux gréseux et conglomeratiques qui alternent avec ceux d'argilites ont été interprétés comme des événements de crues suivis par des périodes de décantation s'effectuant dans des plaines d'inondation. Les traces de conduits racinaires observés dans le Détrit de Rodez témoignent de l'installation de paléosols. Le passage de la Formation des Grès et Argilites bariolées à la Formation Dolomitique correspond au début de la transgression hettangienne. Dès lors, le dépôt de ces nouveaux sédiments carbonatés témoigne d'un nouvel environnement peu profond, calme et plat. Il a été imaginé comme un marais maritime par Arondeau (1982), Demathieu et al. (2002) et Hamon (2004). Près de Mende, des niveaux riches en micro- et macrorestes de cuticules végétales témoignent de la présence de conifères ; ceux-ci étant installés sur la bordure littorale téthysienne durant l'Hettangien/Sinémurien (Thévenard, 1993). Les rares occurrences d'une malacofaune témoignent aussi d'intrusions marines. Les niveaux présentant des fentes de dessiccation ou des empreintes de dinosaures indiquent que les sédiments de la Formation Dolomitique ont décanté sous une tranche d'eau réduite périodiquement asséchée (cf. Demathieu et Gand, 2003b). À noter que la préservation des empreintes résulte d'une diagenèse précoce, probablement associée à des tapis cyano-bactériens sur les surfaces piétinées (Demathieu et al., 2002; Freytet et al., 2003). Les rides de courants, très fréquentes, témoignent aussi de l'action du vent et des marées en domaine tidal devenant quelque peu lagunaire comme le prouvent les rares pseudomorphoses de halite qui ont été observées dans les environs de Mende (Moreau, 2011). Émergés, ces milieux pouvaient être alors propices au passage des dinosaures caussenards qui vivaient sur les bords de cet environnement estuarien (Montenat et Bessonnat, 2003), tour à tour paralique, continental ou marin, et transgressé par la Téthys.

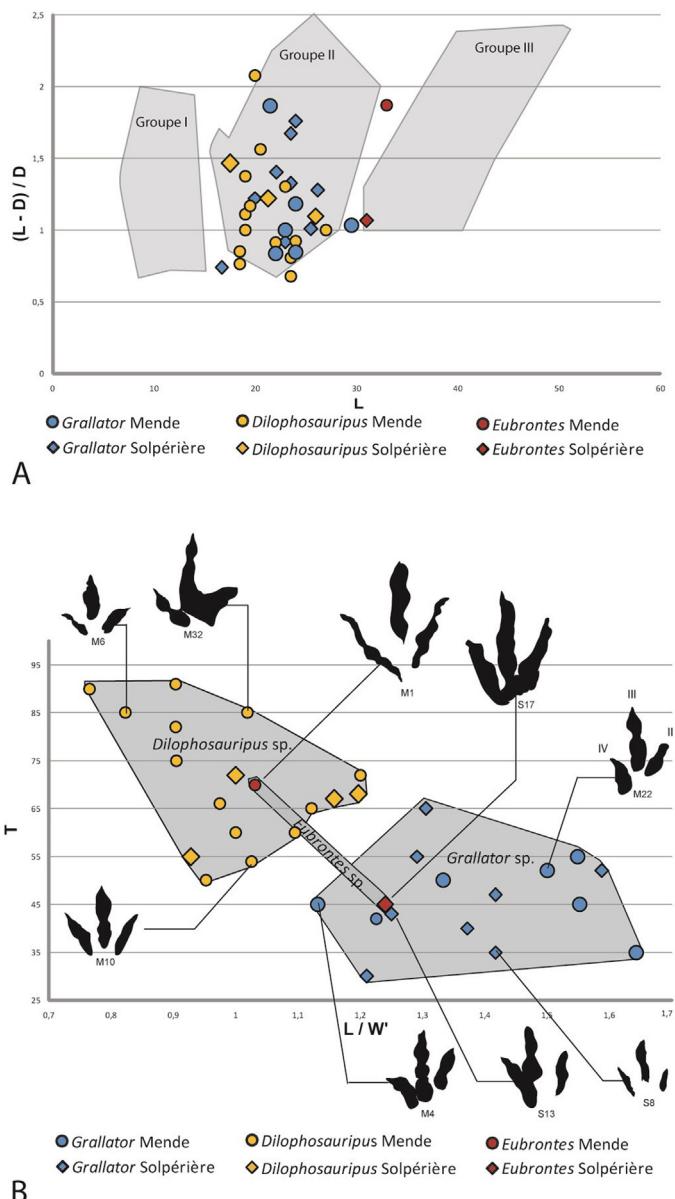


Fig. 9. A. Diagramme représentant L par rapport à $(L-D)/D$ incluant les trois groupes morphologiques définis par Demathieu et al. (2002), avec les traces de Mende et de Solprière. B. Diagramme (L/W') par rapport à T avec les espaces biométriques de chacun des ichnogénèses. Doigts II, III et IV de droite à gauche pour toutes les ichnites. A. L vs. $(L-D)/D$ diagram including the three morphological groups defined by Demathieu et al. (2002), and the traces from Mende and Solprière. B. (L/W') vs. T diagram with biometric spaces of each morphotype. Digital traces II, III and IV from right to left.

L'assemblage fossile de l'Hettangien de Lozère présente avec son équivalent contemporain de Vendée de nombreux points communs, tant au niveau de la série sédimentaire détritique puis carbonatée (Thévenard et al., 2003), que des ichnofossiles reptiliens avec *Grallator* et *Eubrontes*, et de la paléoflore avec l'association *H. airelensis*, *P. peregrinum* et *Brachiphyllum* sp. (Demathieu, 2003; Demathieu et Gand, 2003a; Montenat et Bessonnat, 2003; Thévenard et al., 2003). Relevant des similitudes entre l'assemblage fossile de Vendée et celui du Connecticut à la même période (Olsen et al., 1998), Montenat et Bessonnat (2003) avaient identifié l'existence d'une province biogéographique nord-atlantique subtropicale homogène, située à l'époque entre les 30° et 20° de latitude nord, et couvrant l'Europe occidentale et l'Amérique du Nord avant l'ouverture de l'Atlantique.

Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

Remerciements

Nous remercions l'Association Paléontologique des Hauts Plateaux du Languedoc (A.P.H.P.L.) qui assura le financement des fouilles de Mende. Nous remercions également ses membres dont Louis Baret, Joachim Jeanneau et Vincent Sallé qui ont œuvré pendant toute la durée du chantier. Nous adressons toute notre gratitude à Madame Séverine Delorme de l'Office National des Forêts ainsi qu'à la Mairie de Mende sans qui les fouilles n'auraient pas vu le jour. Nous remercions aussi Monsieur Michel Moreau, ancien garde du Parc National des Cévennes qui nous a fourni les informations concernant les conditions de la découverte du gîte de Solprière. Pour finir, nos remerciements se tournent vers Daniel André, Michel Wienin puis le Parc National des Cévennes pour leur soutien.

Références

- Allain, R., Suberbiola, X.P., 2003. *Dinosaurs of France*. Comptes Rendus Palevol 2, 27–44.
- Arrondeau, J.-P., 1982. *Étude sédimentologique du Lias inférieur carbonaté du seuil caussenard et de ses abords (Languedoc)* (Thèse Université de Nantes). Université de Nantes, Nantes (230 p. [inédit]).
- Briand, B.-G., Couturié, J.-P., Geffroy, J., Gèze, B., 1979. Notice explicative, carte géologique au 1/50 000^e de la France, feuille de Mende (862). BRGM, Orléans (52 p.).
- Briand, B.-G., Combémorel, R., Couturié, J.-P., Bérard, P., Vaurelle, C., 1993. Notice explicative, carte géologique au 1/50 000^e de la France, feuille du Bleymard (863). BRGM, Orléans (76 p.).
- Brouder, P., Gèze, B., Macquar, J.-C., Paloc, H., 1977. Notice explicative, carte géologique au 1/50 000^e de la France, feuille de Meyrueis (910). BRGM, Orléans (29 p.).
- Demathieu, G., 1990. *Problem in discrimination of tridactyl dinosaur footprints, exemplified by the Hettangian trackways, the Causses, France*. Ichnos 1, 97–110.
- Demathieu, G., Sciau, J., 1992. Des pistes de dinosaures et de crocodiliens dans les dolomies de l'Hettangien du Causse du Larzac. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris 315, 1561–1566.
- Demathieu, G., 1993. *Empreintes de pas de dinosaures dans les Causses (France)*. Zibia. Monografico 5, 229–252.
- Demathieu, G., Sciau, J., 1999. De grandes empreintes de pas de dinosaures dans l'Hettangien de Peyre (Aveyron, France). Geobios 32, 609–616.
- Demathieu, G., 2003. Comparaison des ichnopopulations des Grands Causses (Sud de la France) et du Veillon (Vendée). Le Naturaliste Vendéen 3, 59–60.
- Demathieu, G., Gand, G., 2003a. Signification des aires à empreintes de pas de vertébrés des Grands Causses (Biologie et Physiologie). Le Naturaliste Vendéen 3, 55–58.
- Demathieu, G., Gand, G., 2003b. Les sites à traces de pas de vertébrés du Trias à l'Hettangien. Contenu et interprétation. Le Naturaliste Vendéen 3, 47–53.
- Demathieu, G., Gand, G., Sciau, J., Freytet, P., 2002. Les traces de pas de dinosaures et autres archosaures du Lias inférieur des Grands Causses, sud de la France. Palaeovertebrata 31, 1–143.
- Ellenberger, P., 1988. La découverte des pistes de dinosaures de Camprieu. Causses et Cévennes 7, 139–140.
- Freytet, P., Lange-Badré, B., Barrier, P., Gand, G., Montenat, C., 2003. La fossilisation des empreintes de pattes et autres traces biologiques. Rôle du voile algare et de la diagenèse précoce. Le Naturaliste Vendéen 3, 61–62.
- Gand, G., Demathieu, G., Montenat, C., 2007. Les traces de pas d'amphibiens, de dinosaures et autres reptiles du Mésozoïque français : inventaire et interprétations. Palaeovertebrata 35, 1–149.
- Gèze, B., Pellet, J., Paloc, H., Bambier, A., Roux, J., Senaud, G., 1980. Notice explicative, carte géologique au 1/50 000^e de la France, feuille de Florac (886). BRGM, Orléans (52 p.).
- Grigniac, C., Taugourdeau-Lantz, J., 1982. Découverte de microflores d'âge Hettangien dans l'épandage gréso-conglomératique « triasique » formant la base du Mésozoïque de la région de Figeac-Capdenac (Quercy). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris 295, 57–62.
- Hamon, Y., 2004. Morphologie, évolution latérale et signification géodynamique des discontinuités sédimentaires : exemple de la marge Ouest du Bassin du Sud-Est (France) (Thèse Université Montpellier II). Université Montpellier II, Montpellier (293 p. [inédit]).
- Hitchcock, E., 1845. An attempt to name, classify, and describe, the animals that made the fossil footmarks of New England. In: Proceedings 6th Annual Meeting Association American Geologists and Naturalists, New Haven, Connecticut, pp. 23–25.
- Hitchcock, E., 1858. *Ichnology of New England. A Report on the Sandstone of the Connecticut Valley. Especially its Fossil Footmarks*. William White editions, Boston (220 p.).
- Lapparent, A.F., Montenat, C., 1967. Les empreintes des pas des reptiles de l'Infralias du Veillon (Vendée). Bulletin de la Société géologique de France 107, 1–41.
- Lockley, M., Meyer, C., 1999. *Dinosaur Tracks and other Fossil Footprints of Europe*. Columbia University Press, New York (324 p.).
- Lopez, M., 1992. Dynamique du passage d'un appareil terrigène à une plate-forme carbonatée en domaine semi-aride : Trias de Lodève, Sud de la France (Thèse Université Montpellier II). Université Montpellier II, Montpellier (403 p. [inédit]).
- Monod, C., 1935. Du Musée du Désert au Mont-Aigoual, à l'Aven Armand et aux Gorges du Tarn par la Corniche des Cévennes in « Causses et Cévennes ». Revue du Club Cévenol 7, 273–280.
- Montenat, C., Bessonnat, G., 2003. L'ichnofaune reptilienne hettangienne du Veillon (Vendée, France). Le Naturaliste Vendéen 3, 41–45.
- Moreau, J.-D., 2011. Nouvelles découvertes d'empreintes de dinosaures en Lozère. Analyse biométrique des traces et synthèse paléoenvironnementale de l'Hettangien. Association Paléontologique des Hauts Plateaux du Languedoc, Mende, Lozère (34 p.).
- Moreau, J.-D., Gand, G., Fara, E., Michelin, A., 2012a. Biometric and morphometric approaches on Lower Hettangian dinosaur footprints from the Rodez Strait (Aveyron, France). Comptes Rendus Palevol 11, 231–239.
- Moreau, J.-D., Baret, L., Trincal, V., André, D., 2012b. Empreintes dinosauroïdes de l'Hettangien de Gatuzières (Lozère, France). Ichnologie dinosaurienne du Jurassique de Meyrueis. Association Paléontologique des Hauts Plateaux du Languedoc, Mende, Lozère, pp. 5–11.
- Olsen, P.E., Smith, J.H., Mc Donald, N.G., 1998. Type material of the type species of the classic theropod footprint genera *Eubrontes*, *Anchisauripus* and *Grallator* early Jurassic. Hartford and Deerfield basins, Connecticut and Massachusetts. USA Journal of Vertebrate Paleontology 18, 586–601.
- Perrissol, M., 1990. Sédimentologie et Métallogénie du Trias et du Lias Carbonaté de la bordure Cévenole (Thèse Université Montpellier II). Université Montpellier II, Montpellier (575 p. [inédit]).
- Sciau, J., 2003. Dans les pas des dinosaures des Causses. Inventaire des sites à empreintes. Association Paléontologique des Causses, Millau (107 p.).
- Simon-Coinçon, R., 1989. Le rôle des paléoaltérations et des paléoformes dans les socles : l'exemple du Rouergue (Massif Central Français) (Thèse École des Mines Paris). École des Mines, Paris (291 p. [inédit]).
- Taugourdeau-Lantz, J., 1983. Associations palynologiques définies dans le Trias Languedocien : interprétations stratigraphiques. Cahiers de Micropaléontologie 3, 5–20.
- Thaler, L., 1962. Empreintes de pas de dinosaures dans la dolomie du Lias inférieur des Causses. Comptes Rendus Sommaires de la Société Géologique de France 7, 190–192.
- Thévenard, F., 1993. Les coniférales du Jurassique inférieur du gisement de Chadelcoste, bassin des Causses (Lozère, France). Review of Palaeobotany and Palynology 78, 145–166.
- Thévenard, F., Deschamps, S., Guignard, G., Gomez, B., 2003. Les plantes fossiles du gisement hettangien de Talmont-Saint-Hilaire (Vendée, France). Le Naturaliste vendéen 3, 69–87.
- Weishampel, D.B., Dodson, P., Osmolska, H., 2004. *The Dinosauria*, second ed. University of California Press, Berkeley (862 p.).
- Welles, S.P., 1971. Dinosaur footprints from the Kayenta Formation of northern Arizona. Plateau 44, 27–38.