

Traces de dinosaures jurassiques

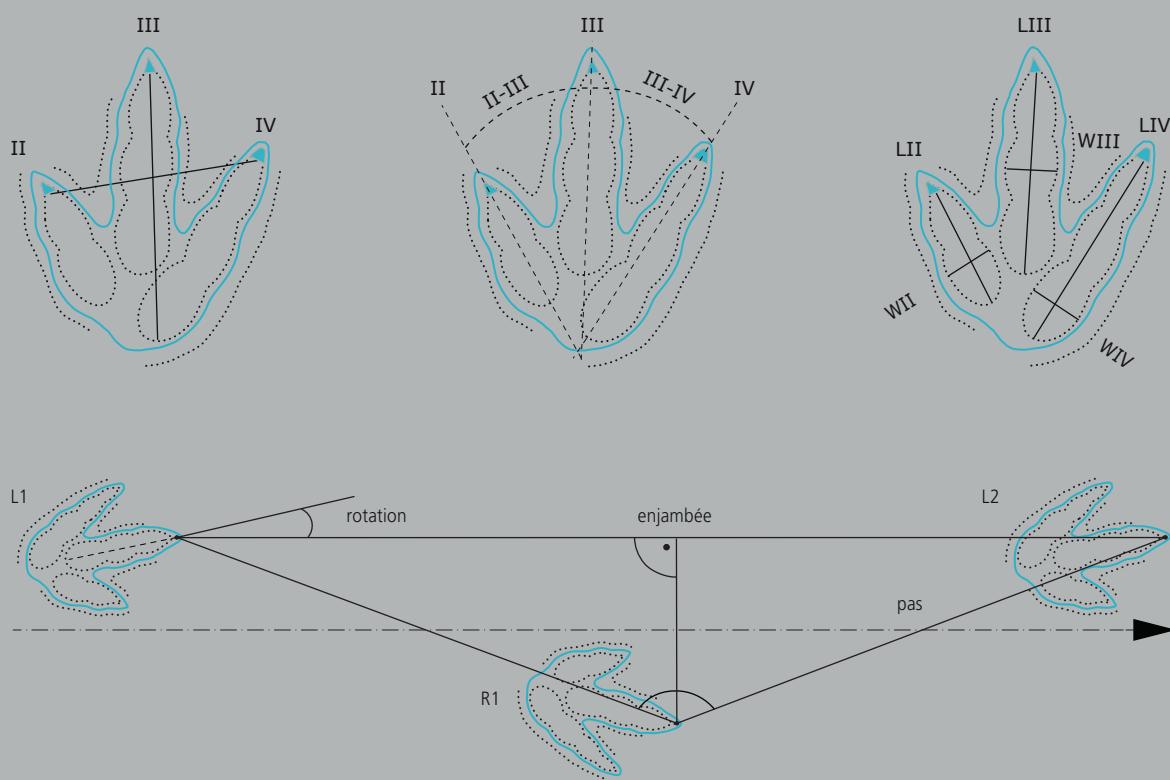
Contexte et méthode

Géraldine Paratte

Marielle Lapaire

Christel Lovis

Daniel Marty





Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
Swiss Confederation

Bundesamt für Strassen ASTRA
Office fédéral des routes OFROU
Ufficio federale delle strade USTRA
Uffizi federali da vías UVIAS
Federal Roads Office FEDRO



JURA CH RÉPUBLIQUE ET CANTON DU JURA

DÉPARTEMENT DE LA FORMATION, DE LA CULTURE ET DES SPORTS
OFFICE DE LA CULTURE
SECTION D'ARCHÉOLOGIE ET PALÉONTOLOGIE
PALÉONTOLOGIE A16

Basée à Porrentruy, la Paléontologie A16 est financée par l'Office fédéral des routes (OFROU) et par la République et Canton du Jura. Sa mission se concentre sur le tracé A16 de 24,675 km de long, comprenant les sections autoroutières situées entre Boncourt et Porrentruy, ainsi qu'entre Delémont et Choindez. Sa mission principale consiste à documenter les nombreuses découvertes mises au jour et l'exploitation scientifique des données, la gestion de la documentation et des collections ainsi que la transmission de l'ensemble de cet héritage à la République et Canton du Jura.

Traces de dinosaures jurassiques

Contexte et méthode

Géraldine Paratte

Marielle Lapaire

Christel Lovis

Daniel Marty

Avec des contributions de

Gaël Comment

Bertrand Conus

Andreas Iberg

Claude Gigon

Pierre-Alain Moeschler

Pascal Morisod

Olivier Noaillon

Renaud Roch

Martine Rochat

Sous la direction de
Wolfgang Alexander Hug
Vincent Friedli
Jean-Paul Billon-Bruyat

Office de la culture
Paléontologie A16
Porrentruy, 2018

CPPJ – A16
Catalogues du patrimoine
paléontologique jurassien – A16



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Bundesamt für Strassen ASTRA
Office fédéral des routes OFROU
Ufficio federale delle strade USTRA
Uffizi federali da vie UVIAS
Federal Roads Office FEDRO



JURA.CH RÉPUBLIQUE ET CANTON DU JURA

DÉPARTEMENT DE LA FORMATION, DE LA CULTURE ET DES SPORTS
OFFICE DE LA CULTURE
SECTION D'ARCHÉOLOGIE ET PALÉONTOLOGIE
PALÉONTOLOGIE A16

Publié avec le concours du

Département de la formation, de la culture et des sports
et du Département de l'environnement de la République et Canton du Jura.

Recherches et rédaction

Office de la culture
Paléontologie A16
Hôtel des Halles
Case postale 64
CH-2900 Porrentruy 2
Tél. 032 420 84 00
secr.occ@jura.ch
www.jura.ch/occ

Révision, maquette, mise en pages et impression

Vincent Friedli, Marie-Claude Farine et Simon Maître.

Code de citation préconisé

Paratte G., Lapaire M., Lovis C., Marty D. et al. 2018: *Traces de dinosaures jurassiques – Contexte et méthode*. Office de la culture – Paléontologie A16, Porrentruy, 164p.
(Catalogues du patrimoine paléontologique jurassien – A16).

La Collection des Catalogues du patrimoine paléontologique jurassien – A16 est publiée sous les auspices de l'Office de la culture de la République et Canton du Jura.
La Collection documente les nombreuses découvertes en provenance de l'A16 et leur exploitation scientifique.

© février 2018
Office de la culture
Paléontologie A16
Porrentruy

ISSN 2504-4745
ISBN 978-2-88436-042-5

Avant-propos

Basée à Porrentruy, la Paléontologie A16 est un projet pilote de paléontologie autoroutière, financé à hauteur de 95% par l'Office fédéral des routes et de 5% par la République et Canton du Jura. Sa mission, de 2000 à 2018, se concentre sur le tracé de la route nationale A16 Transjurane, long de 24,675 km. La Paléontologie A16 a prospecté et fouillé 64 sites des sections autoroutières 1, 2, 3, 7 et 8 entre Boncourt et Porrentruy – principalement sur le plateau de Courtedoux – ainsi qu'entre Delémont et Choindez. Les découvertes paléontologiques sont le fruit de cette activité de terrain de grande envergure, avec des fouilles contrôlées menées de 2005 à 2011, grâce au soutien financier conséquent de l'Office fédéral des routes. La mission principale de la Paléontologie A16 consiste à sauvegarder ces nombreuses découvertes, à les documenter, les gérer en collection, les exploiter scientifiquement et, finalement, transmettre l'ensemble de cet héritage à la République et Canton du Jura.

Dans ce cadre, les *Catalogues du patrimoine paléontologique jurassien–A16* ont été créés sur une idée originale de Wolfgang A. Hug, responsable de l'équipe Paléontologie A16 de 2002 à 2016. Ils sont réalisés par la Paléontologie A16 et publiés sous les auspices de l'Office de la culture de la République et Canton du Jura.

Le but de ces catalogues est de présenter les principales découvertes paléontologiques A16 et leur documentation exhaustive et inédite, en particulier pour les sites à traces de dinosaures. Ils accompagnent ainsi l'inventaire de la collection physique de la Paléontologie A16 et ses quelque 65 000 objets répertoriés (fossiles, sédiments, minéraux, etc.). De plus, en facilitant l'accès à une sélection d'objets phares, ces catalogues sont une porte d'entrée vers les découvertes paléontologiques A16 pour la communauté scientifique. La diffusion de la série complète des catalogues en format papier est limitée, mais une version électronique est disponible en ligne et en libre accès.

Les thèmes couverts par les catalogues correspondent aux principales études menées par la Paléontologie A16. Les couches géologiques de trois grandes périodes traversées par l'A16 ont déterminé la nature des découvertes et donc des études. Pour le Mésozoïque, il s'agit en particulier des traces de dinosaures, des vertébrés et des invertébrés marins mis au jour dans les calcaires et les marnes du Jurassique supérieur (Oxfordien et Kimméridgien). Pour le Cénozoïque, il s'agit essentiellement des faunes de mammifères et de microfossiles de la Molasse (Éocène, Oligocène et Miocène) et des faunes de mammifères des dolines à la fin du Cénozoïque (Pléistocène).

Les données cataloguées sont présentées de manière synthétique, synoptique et richement illustrée (fossiles, localités, coupes géologiques, méthodologie de fouille, etc.). Les coordonnées spatiale et temporelle de chaque objet sont précisément indiquées; la détermination de chaque fossile reste fonction de l'état actuel des connaissances. Les catalogues documentent aussi certaines analyses menées, sous forme de mandats, par des instituts externes.

Les *Catalogues du patrimoine paléontologique jurassien–A16* sont le reflet de la devise de la Paléontologie A16: Sauvegarder, Étudier, Transmettre. Qu'ils soient utiles pour la mémoire de cette activité unique, pour de futures études scientifiques et pour la gestion pérenne de ce patrimoine – d'importance nationale –, dont la responsabilité incombe à la République et Canton du Jura.

Merci à toutes les collaboratrices et à tous les collaborateurs de l'équipe de la Paléontologie A16 : ces catalogues constituent un bel aboutissement de votre engagement.

Porrentruy, le 31 mai 2017

Jean-Paul Billon-Bruyat
Responsable de la Paléontologie A16

Table des matières

1	Introduction	9
1.1	La paléontologie dans le canton du Jura	9
1.1.1	Fondation paléontologique jurassienne	9
1.1.2	Paléontologie A16	9
1.1.3	Projet PaléoJura (2008-2013)	10
1.1.4	Fondation Jules Thurmann et Jurassica	10
1.2	Historique des traces de dinosaures dans la chaîne du Jura	11
1.3	Paléontologie A16, découverte et documentation des empreintes de dinosaures	16
2	Situation géographique et géologique	19
2.1	Généralités	19
2.2	Géographie et paléogéographie	20
2.3	Paléoenvironnement	21
2.4	Paléoclimat	22
2.5	Contexte stratigraphique	22
2.5.1	Membre du Banné	22
2.5.2	Membre de Courtedoux	22
2.5.3	Membre de Chevenez	26
2.5.4	Biostratigraphie	26
3	Travail de terrain	27
3.1	Techniques de fouille	27
3.2	Topographie et carroyage	30
4	Sédimentologie	35
4.1	Levers de coupe	35
4.1.1	Fouilles et levers de coupe	36
4.1.2	Problématique des levers de coupe	36
4.1.3	Procédés	36
4.2	Numérisation des coupes	40
4.3	Étude des microfaciès	40
4.4	Analyses spécifiques	40
5	Fossiles	41
5.1	Macrofossiles	41
5.2	Microfossiles	41

6 Documentation des empreintes.....	43
6.1 Documentation scientifique.....	43
6.1.1 Analyse des surfaces et identification ichnologique	43
6.1.1.1 Généralités.....	45
6.1.1.2 Analyse	47
6.1.1.3 Applications	53
6.1.1.4 Synthèse.....	56
6.1.2 Nomenclature des empreintes et des pistes.....	60
6.1.3 Description scientifique des pistes.....	65
6.1.3.1 Description générale des pistes.....	66
6.1.3.2 Croquis.....	66
6.1.3.3 Description détaillée des empreintes	66
6.1.4 Paramètres de pistes: mesures de terrain.....	68
6.1.4.1 Empreintes de sauropodes.....	70
6.1.4.2 Pistes de sauropodes.....	71
6.1.4.3 Empreintes tridactyles.....	74
6.1.4.4 Pistes de tridactyles.....	75
6.1.5 Paramètres de pistes: données informatisées.....	76
6.1.6 Paramètres de pistes: fichiers statistiques.....	81
6.1.6.1 Moyennes des paramètres de pistes de sauropodes et de tridactyles.....	81
6.1.6.2 Écarts types des paramètres de pistes	84
6.1.7 Paramètres de pistes: base de données.....	86
6.1.8 Description et mesure des paramètres des empreintes isolées et des traces énigmatiques	88
6.1.8.1 Techniques de documentation de terrain	88
6.1.8.2 Traitement des données	89
6.1.8.3 Dénomination et numérotation des empreintes isolées	91
6.1.8.4 Cas particuliers.....	91
6.2 Documentation technique	92
6.2.1 Relevés de terrain à l'échelle 1:20.....	92
6.2.2 Relevés de terrain à l'échelle 1:1	94
6.2.3 Techniques de moulage de traces de dinosaures	95
6.2.3.1 Réalisation des moules	95
6.2.3.2 Réalisation des tirages.....	97
6.2.4 Techniques de prélèvement de traces de dinosaures.....	101
6.2.4.1 Extraction des prélevements sur le terrain.....	101
6.2.4.2 Préparation-conservation des prélevements	106

6.3 Plans et figures	112
6.3.1 Plans synoptiques de surface.....	112
6.3.1.1 <i>Description des différents calques dans les fichiers Illustrator</i>	112
6.3.1.2 <i>Cas particulier de Courtedoux-Béchat Bovais (CTD-BEB), couche 500</i>	114
6.3.1.3 <i>Vectorisation dynamique</i>	115
6.3.2 Plans index des prélèvements et des moulages	117
6.3.3 Méthode pour isoler les pistes	118
6.3.4 Orientation, longueur et direction des pistes.....	119
6.3.5 Rosaces de direction	120
6.3.6 Histogrammes	121
6.4 Documentation multimédia.....	122
6.4.1 Prises de vues systématiques des pistes et des empreintes	122
6.4.2 Photomontages.....	124
6.4.3 Photos stéréo – anaglyphes	126
6.5 Mandats externes	128
6.5.1 Orthophotographie	128
6.5.2 Balayage laser	132
6.5.3 Balayage laser haute définition	134
6.5.4 Modèles photogrammétriques 3D	135
Annexe 1 – Système d’information documentaire	137
Annexe 2 – Méthode pour réaliser les plans des pistes isolées	142
Annexe 3 – Méthode pour déterminer les orientations et la longueur des pistes	144
Annexe 4 – Méthode pour réaliser les plans de direction des pistes	145
Annexe 5 – Lexique	146
 Bibliographie générale	149
Contributions	159
Remerciements	160
Crédits	163

1 Introduction

Depuis près de deux siècles, la richesse du sous-sol jurassien fascine les géologues et les paléontologues, qu'ils soient professionnels ou amateurs. Les premières observations lithologiques dans la chaîne du Jura remontent au XVIII^e siècle déjà.

C'est cependant au début du XIX^e siècle que la stratigraphie de cette région intéresse réellement les spécialistes tels Jules Thurmann, Frédéric-Louis Koby, Amanz Gressly, Jean-Baptiste Greppin, Charles Louis Contejean, Louis Agassiz et Louis Rollier. En 1795, Alexander von Humbold introduit le terme *Jurassique* pour désigner les couches géologiques de la région. Alexandre Brongniart, minéralogiste, l'attribue en 1829 à l'unité de temps correspondante (-201 à -145 millions d'années), reconnue depuis dans le monde entier. Cependant, dans le canton du Jura, jusqu'à peu, seule une documentation limitée à de rares affleurements naturels, à des forages isolés et à quelques carrières, était à disposition. Depuis une dizaine d'années, différentes institutions ont donné une impulsion nouvelle à la paléontologie régionale.

1.1 La paléontologie dans le canton du Jura

1.1.1 Fondation paléontologique jurassienne

Établie à Glovelier, la Fondation paléontologique jurassienne (FPJ) a été créée en 2002. Elle a constitué une collection remarquable de plus de 40 000 fossiles provenant de toute la chaîne du Jura et de couches stratigraphiques diverses. Ces fossiles sont mis en valeur par des techniques de préparation propres au traitement des fossiles, et identifiés selon la classification établie. Les membres de la Fondation disposent d'une connaissance approfondie en matière de préparation de fossiles, ainsi qu'en paléontologie et en géologie régionale. Ils orientent surtout leurs activités vers le développement de la paléontologie dans la région.

1.1.2 Paléontologie A16

Le projet de l'A16 Transjurane présenté par le Conseil fédéral aux Chambres est avalisé le 1^{er} octobre 1984. Une route nationale reliera la frontière franco-suisse à Bienne, connectant le canton du Jura au réseau existant des voies de communication les plus importantes (fig. 1 et 2). Une fois achevée, elle traversera la chaîne jurassienne. En 1979, lorsque le Jura entre en souveraineté, les nouvelles autorités n'estimaient pas nécessaire de mettre en place un service d'archéologie. Pourtant, plusieurs découvertes importantes engendrent sa création, en 1985, avec le principal mandat de gérer les fouilles liées à la construction de l'autoroute A16. Grâce à la richesse du sous-sol jurassien et à la motivation de la Fondation paléontologique jurassienne (notamment B. Hostettler) et des professeurs C.A. Meyer (Bâle) et J.-P. Berger (Fribourg), un service de paléontologie est également mis sur pied en février 2000. Intégré à l'Office de la culture, il rejoint l'archéologie pour former une unité commune basée à Porrentruy: la *Section d'archéologie et paléontologie* (SAP). La *Paléontologie A16* (PAL A16) constitue dans sa phase



Fig. 1. Tracé autoroutier de l'A16 Transjurane (www.a16.ch, janvier 2018).



Fig. 2. Vues aériennes: a) en direction du nord, sur le tracé de l'A16 entre le viaduc du Creugenat et le tunnel de Bure; b) en direction de l'ouest, à l'entrée est de Porrentruy (www.a16.ch).

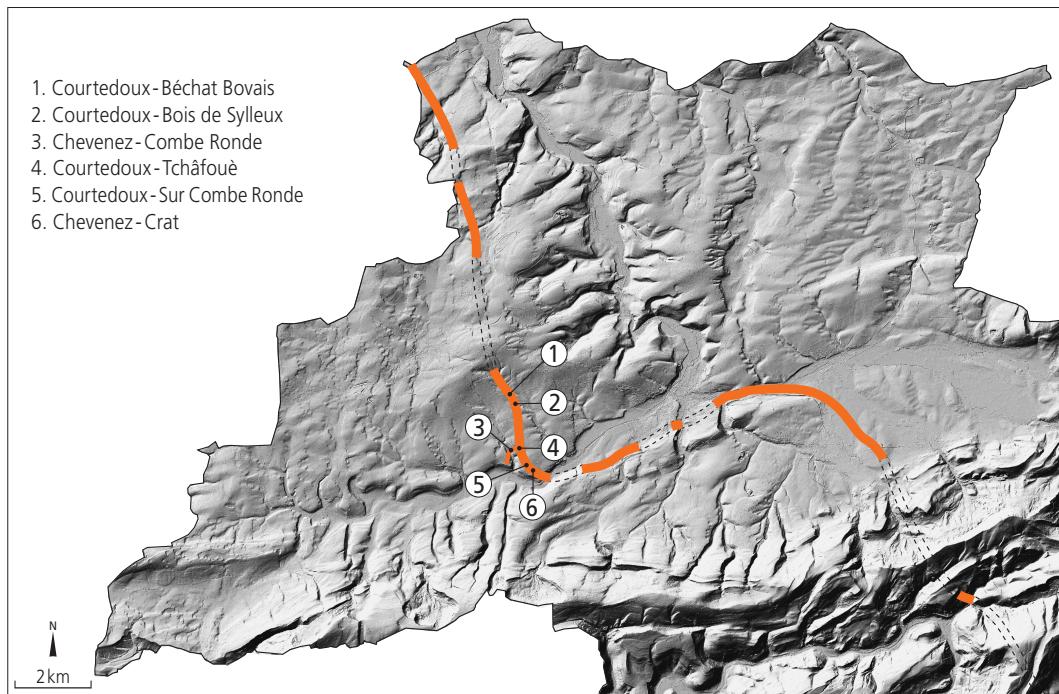


Fig. 3. Sites à traces de dinosaures fouillés par la Paléontologie A16 sur le tracé autoroutier.

initiale un projet pilote dans le domaine de la paléontologie à l'échelle suisse et même européenne. Selon les termes de la législation fédérale sur les routes nationales, la Transjurane – et par là même la Section d'archéologie et paléontologie – est financée à 95% par la Confédération et à 5% par la République et Canton du Jura. Le mandat de la PAL A16 consiste à sauvegarder, documenter et étudier tout objet paléontologique d'importance patrimoniale fouillé le long du futur tracé autoroutier (fig. 3). Après achèvement des travaux de fouille en 2011, les années 2012 à 2018 vont s'orienter sur la gestion de la documentation et des collections, l'exploitation scientifique des données et, enfin, la transmission de l'ensemble de cet héritage à la République et Canton du Jura.

1.1.3 Projet PaléoJura (2008-2013)

Afin de mettre en valeur les richesses paléontologiques et géologiques cantonales, le projet *PaléoJura* est instauré par les autorités jurassiennes en 2008. Un crédit-cadre entre en vigueur pour une première période de trois ans. Rattaché à

l'Office de la culture, ce projet s'inscrit dans une démarche complémentaire aux opérations de sauvegarde du patrimoine menées dans le cadre des financements fédéraux, permettant la valorisation scientifique et la communication au grand public de ce patrimoine (journées portes ouvertes sur le terrain, sentier didactique, colloques scientifiques, ateliers pédagogiques, expositions) (fig. 4). Outre la collaboration avec la PAL A16, les activités de PaléoJura se sont déployées en lien avec le Musée jurassien des sciences naturelles (MJSN), institution cantonale basée à Porrentruy.

1.1.4 Fondation Jules Thurmann et Jurassica

Un crédit complémentaire a été validé par les députés jurassiens en juin 2012 et la Fondation *Jules Thurmann* constituée à Porrentruy en septembre de la même année. Depuis 2014, cette nouvelle entité, sous l'appellation institutionnelle *Jurassica*, prend le relais de l'Office de la culture et intègre les missions et les activités de PaléoJura, ainsi que celles du Musée jurassien des sciences naturelles (MJSN) et de son Jardin botanique.



Fig. 4. Vues nocturnes lors des portes ouvertes sur le site de Courtedoux-Béchat Bovais en 2009.





Fig. 5. Satellite Dinotec-Jurassica: mise en valeur d'empreintes découvertes dans la cour intérieure des bâtiments de la Division technique (anciennement Centre professionnel de Porrentruy, CPP) du Centre jurassien d'enseignement et de formation (CEJEF), lors d'une phase de travaux d'agrandissement.

Au cours de la législature 2011-2015, un projet de construction d'un musée et d'un centre de gestion des collections est élaboré. Cela afin de permettre l'accueil des visiteurs et de garantir un archivage optimal des objets des collections historiques du MJSN ou de ceux issus des fouilles paléontologiques et archéologiques de l'A16. Les nouvelles infrastructures prévoient également un parc paléontologique sur les communes de Courtedoux et de Chevenez, associant visite de sites fossilières et balade nature. La mise en valeur d'un site à traces de dinosaures à Porrentruy (fig. 5), la promotion du Jardin botanique, ainsi que l'ouverture d'un site de fouille dans des couches très fossilières sur la colline du Banné à Porrentruy, sont autant de projets développés par l'institution. Afin de perpétuer les synergies mises en place avec les milieux universitaires, Jurassica a développé pour la région un pont universitaire actif. Ce projet vise la mise à disposition d'un service scientifique auxiliaire en géosciences pour les hautes écoles suisses et étrangères. La mise en place d'une telle structure garantira aussi l'accès aux collections paléontologiques jurassiennes pour les chercheurs externes et les étudiants, tout en offrant un cadre adéquat et formateur pour les techniques de gestion, de préparation et de conservation des fossiles.

1.2 Historique des traces de dinosaures dans la chaîne du Jura

Au XIX^e siècle déjà, des ossements de dinosaures furent retrouvés dans le canton de Berne, près de Moutier. Ces restes attribués à *Cetiosauriscus greppini* proviennent de la carrière de la Basse Montagne, avec des couches datées du Kimmeridgien inférieur (Greppin 1870; von Huene 1922, 1926; Schwarz et al. 2007a). Les premières empreintes n'ont été découvertes qu'en 1989 dans la carrière de Lommiswil, près de Soleure (Meyer 1990) (fig. 8). C'est le premier signe qui atteste véritablement de la présence de grandes étendues de terres connectées entre elles sur la plate-forme carbonatée jurassienne durant le Jurassique supérieur (Meyer 1993). Depuis ces premières découvertes, plus d'une vingtaine de sites ont été mis au jour dans le Jurassique supérieur des montagnes jurassiennes (Meyer & Thüring 2003a) (fig. 6, 7 et 9). Exceptés ceux de Lommiswil et de Moutier, la plupart des sites

à traces de dinosaures en Suisse sont plutôt de petite taille. De plus, les affleurements naturels, soumis à l'altération pendant de longues périodes, offrent généralement des traces assez mal préservées. La majorité d'entre eux provient de niveaux datés du Kimméridgien (Formation de Reuchenette) ou du Tithonien (Formation de Twannbach) (p. ex. Meyer & Lockley 1996; Meyer & Thüring 2003a).

Dans le Jura français, plusieurs sites à traces de dinosaures ont également été retrouvés (fig. 6 et 7). Parmi eux, le site de Loulle (Jura, F; fig. 9e-f), daté de l'Oxfordien, comprend des empreintes de sauropodes et de théropodes découvertes dans une grande carrière désaffectée (Mazin & Hantzpergue 2006; Cariou et al. 2014) et correspond au niveau le plus ancien avec des empreintes de dinosaures pour la région jurassienne. Ce site atteste la présence des premières surfaces de terres émergées de la plate-forme carbonatée jurassienne en connexion avec le Massif central au sud-ouest, les massifs rhénan et de Londres-Brabant au nord/nord-ouest et enfin le massif bohémien au nord-est. Ces connexions auraient permis la migration de dinosaures durant l'Oxfordien supérieur. L'existence de grandes surfaces émergées, de l'Oxfordien moyen à supérieur, est confirmée par l'enregistrement de fragments fossilisés de dinosaures. Des ossements ont été retrouvés en France, par exemple à Damparis (Jura, F) (Lapparent 1943; Buffetaut 1988), et une dent isolée de théropode provient de Röschenz (BL) (Meyer & Thüring 2003a). De nombreux restes de charophytes et de plantes sont aussi connus dans des dépôts de l'Oxfordien moyen à supérieur (p. ex. Ziegler 1956; Oertli & Ziegler 1958; Barale & Contini 1976; Enay 1980; Philippe 1995; van Konijnenburg-van Cittert & Meyer 1996; Mojón 2002; Gee et al. 2003), confirmant la présence de terres émergées.

Une douzaine d'autres niveaux à empreintes ont été retrouvés dans le Kimmeridgien-Tithonien, en particulier sur les sites de Plagne (Ain, F; fig. 9d) et Coisia (Jura, F; fig. 9g) (p. ex. Le Lœuff et al. 2006; Mazin & Hantzpergue 2010; Landry & Orbette 2012; Landry 2013, observ. pers.). Celui de Plagne, près de Bellegarde, correspond à une zone de passage de dinosaures sauropodes et théropodes.

N° carte	Nom du site (localité, canton)	Lithostratigraphie Âge	Description	Références
Empreintes				
1	Bürenberg (Romont, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	empreintes de sauropodes, piste de saupode représentée uniquement par les pieds	Meyer & Hauser 1994 Meyer & Lockley 1996
2	Chevenez-La Combe (carrière) (Chevenez, JU)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf./sup.	58 empreintes de dinosaures dont plusieurs pistes de théropodes	données de la Paléontologie A16, non publiées
3	Corcelles (Corcelles, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	empreintes de sauropode	Meyer 2000 Meyer & Thüring 2003 données de Meyer, non publiées
4	Frinvilier (Frinvilier, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf.	1 piste de sauropode	Ayer & Claude 2001
5	Gänsbrunnen (Gänsbrunnen, SO)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	empreintes de sauropode	Meyer 2000 Meyer & Thüring 2003
6	Glovelier-Contournement (Glovelier I) (Glovelier, JU)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf./sup.	plusieurs pistes de sauropodes	Hostettler 1999 Tschudin 2001 Jank et al. 2006
7	Glovelier-Côte du Crêt (Glovelier II) (Glovelier, JU)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf./sup.	1 piste de grand théropode	Beuchat 1999
8	Grenchenberg I & II (Grenchen, SO)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	empreintes de sauropodes et de théropodes	Meyer 2000 Meyer & Thüring 2003
9	Sites A16 et hors tracé (Courtedoux et Chevenez, JU)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf. et sup.	60 ichnoassemblages excavés >17 000 m ² , >14 000 empreintes documentées incluant 700 pistes de sauropodes et de théropodes	Marty 2008 Marty & Billon-Bruyat 2009 Marty et al. 2003, 2004, 2007, 2010
10	La Heutte (La Heutte I-IV) (La Heutte, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	empreintes de sauropodes, empreintes de grands théropodes	Meyer & Hauser 1994 Meyer & Lockley 1996
11	Plagne (Plagne-Vacherie Hirschi, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	empreintes isolées de sauropodes	Meyer & Hauser 1994 Meyer 2000
12	Lommiswil (carrière) (Lommiswil, SO)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	>340 empreintes de sauropodes, 9 pistes de sauropodes	Meyer 1990, 1993
13	Oberdorf (carrière) (Oberdorf, SO)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	empreintes isolées de sauropodes	données de Meyer, non publiées
14	Montbautier (Montbautier, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	piste de sauropode	Mouchet 1993 Meyer 1994a
15	Montbautier (Montbautier, BE)	Formation de Twannbach Tithonien inf.	piste de sauropode	données de Meyer, non publiées
16	Moutier-Gorges (Moutier I) (Moutier, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf.	>2000 empreintes isolées de pieds et de mains de sauropodes sur une dalle principale	Meyer & Lockley 1996 Meyer 1997 Lockley & Meyer 2000
17	Moutier-Gorges (Moutier II-IV) (Moutier, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf.	empreintes isolées de sauropodes sur plusieurs petites surfaces	Meyer & Lockley 1996 Meyer 1997 Lockley & Meyer 2000
18	Pierre Pertuis I-IV (Tavannes, BE)	Formation de Twannbach Tithonien inf.	empreintes isolées de sauropodes	Meyer & Lockley 1996 Meyer 2000
19	Porrentruy-Centre professionnel (CPP) (Porrentruy, JU)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf./sup.	409 empreintes documentées incluant 28 pistes de sauropodes et 2 pistes de tridactyles	données de la Paléontologie A16, non publiées
20	Reconvillier (Reconvillier, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf.	empreintes de sauropodes	Meyer 1996, 2000
21	Rochefort-Les Grattes (Rochefort, NE)	Formation de Twannbach Tithonien inf.	piste de sauropode	Marty et al. 2012
22	Saint-Brais-Sous les Errauts (Saint-Brais, JU)	Membre de Röschenz Oxfordien moyen	empreintes isolées de sauropodes et de tridactyles (déformations visibles sur la partie inférieure de la couche)	données de Marty et al., non publiées
23	Saint-Brais-Tariche (Saint-Brais, JU)	Membre de Röschenz Oxfordien moyen	empreintes isolées de sauropodes (remplissages visibles en coupe)	données de Marty et al., non publiées
24	Tavannes (Tavannes, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf.	empreintes de sauropodes	Meyer & Thüring 2003
25	Twannberg (Burgfluh) (Twann, BE)	Formation de Twannbach Tithonien inf.	empreintes isolées de sauropode	Meyer & Lockley 1996 Meyer 2000 Meyer & Thüring 2003
26	Coisia (Jura, F)	Calcaires supérieurs des Couches du Chailley Tithonien	170 empreintes dont 9 pistes de sauropodes de type <i>Parabrontopodus</i>	Le Loëuff et al. 2006 Mazin & Hantzpergue 2010 Landry & Orbette 2012, observ. pers.
27	Plagne (Ain, F)	Calcaires supérieurs des Couches du Chailley Tithonien	une piste de grand sauropode longue de 155 m et plusieurs pistes de théropodes de taille moyenne, avec empreintes de tortues, isopodes et gastéropodes	Le Loëuff et al. 2006 Mazin & Hantzpergue 2010 Landry & Orbette 2012, observ. pers.
28	Loulle (Jura, F)	Pierre bleue de Loulle Oxfordien sup.	1500 empreintes dont 23 pistes de sauropodes (pied 20-70 cm de long) de plus de 60 m de longueur et 5 pistes de théropodes (pied 20-80 cm de long)	Mazin & Hantzpergue 2006 Cariou et al. 2013
Ossements et dents				
29	Sites A16 et hors tracé (Courtedoux et Chevenez, JU)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	ossements isolés de ptérosaures provenant des Marnes à <i>virgula</i>	données de la Paléontologie A16, non publiées
30	Moutier-Basse Montagne (carrière) (Moutier, BE)	Formation de Reuchenette Kimméridgien inf.	134 ossements de sauropodes (<i>Cetiosauriscus</i>) de deux individus au moins ; un humérus droit de sauropode présentant une capsule de cartilage bien préservée à son extrémité distale ; une grande dent de <i>Ceratosaurus</i> (Kentrosaurus)	Greppin 1870 Meyer & Thüring 2003 Schwarz et al. 2007
31	Oberbuchsiten (Oberbuchsiten, SO)	Formation de Villigen Oxfordien sup.	fémur gauche d'un stégosaure, peut-être « d'affinité africaine » (Kentrosaurus)	Meyer & Hunt 1998
32	Péry-Reuchenette (carrière) (Péry-Reuchenette, BE)	Formation de Vellerat Oxfordien sup.	plusieurs ossements de ptérosaures associés à des restes de plantes	données de la Fondation paléontologique jurassienne (Glovelier), non publiées
33	Porrentruy-Roche de Mars (Porrentruy, JU)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	fragments isolés d'une phalange d'aile d'un <i>Rhamphorhynchidae</i>	Billon-Bruyat 2005
34	Röschenz-Silberloch (grotte) (Röschenz, BL)	Formation de Vellerat ? Oxfordien moyen à sup. ?	1 dent isolée d'allosaurié, trouvée dans le gravier meuble au fond de la grotte	Meyer & Thüring 2003
35	Soleure (carrière près de St. Niklaus) (Soleure, SO)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	2 dents isolées de théropodes provenant du « Calcaire à Tortues de Soleure »	von Huene 1926 Meyer & Thüring 2003
36	Soleure (carrière près de St. Niklaus) (Soleure, SO)	Formation de Reuchenette Kimméridgien sup.	phalange II isolée d'aile d'un ptérosaure ptérodactyle provenant du « Calcaire à Tortues de Soleure »	von Huene 1926 Meyer & Hunt 1999
37	Damparis (Jura, F)	Calcaires « séquanien » Oxfordien	squelette de sauropode (6 dents, 7 vertèbres, le sacrum, des côtes, la ceinture scapulaire, 1 humérum, 1 cubitus, 1 radius, fémur, tibia, etc.) d'un sauropode géant (le membre antérieur mesure 2,6 m de long) ; ce grand dinosaure aux membres antérieurs plus longs que les membres postérieurs appartient apparemment à la famille des brachiosauridés ; des dents de théropodes (1 grande de 11 cm et des petites) ont également été mises au jour	Lapparent 1943 Buffetaut 1988

Fig. 6. Tableau des différents sites à traces (en rouge sur la fig. 7) et ossements (en bleu sur la fig. 7) de dinosaures et de ptérosaures découverts dans le Jura suisse et français.

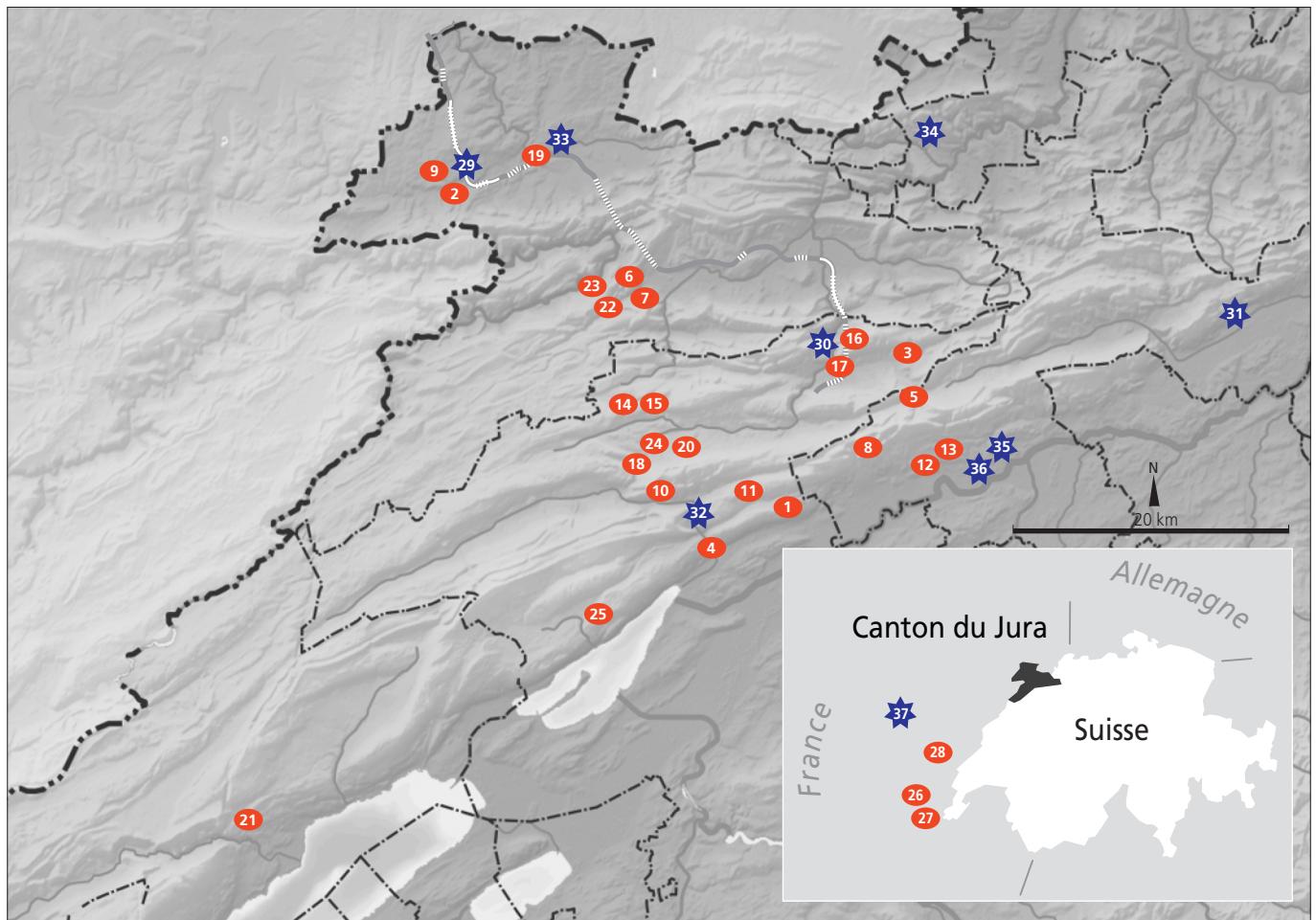


Fig. 7. Carte de situation des différents sites à traces (en rouge) et à ossements (en bleu) de dinosaures et de ptérosaures découverts dans le Jura suisse et français (liste de la fig. 6).

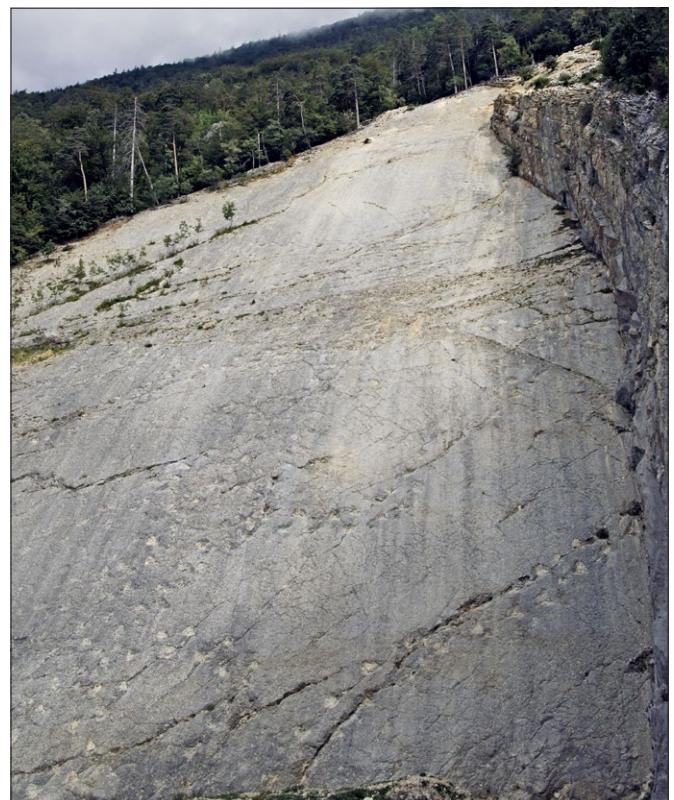
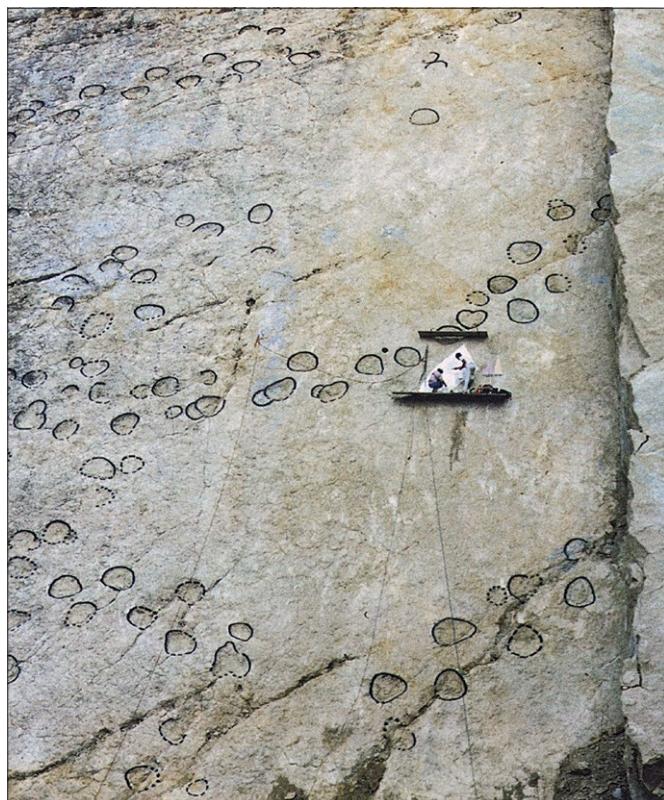


Fig. 8. Vues sur le site de Lommiswil (SO), (à gauche: scanné d'après Meyer 1994, p. 62).



Fig. 9. Vues de différents sites à traces : a) Rochefort-Les Grattes (NE, n° 21); b) Saint-Brais-Sous les Errauts (JU, n° 22); c) La Heutte (BE, n° 10); d) Plagne (Ain, F, n° 27);

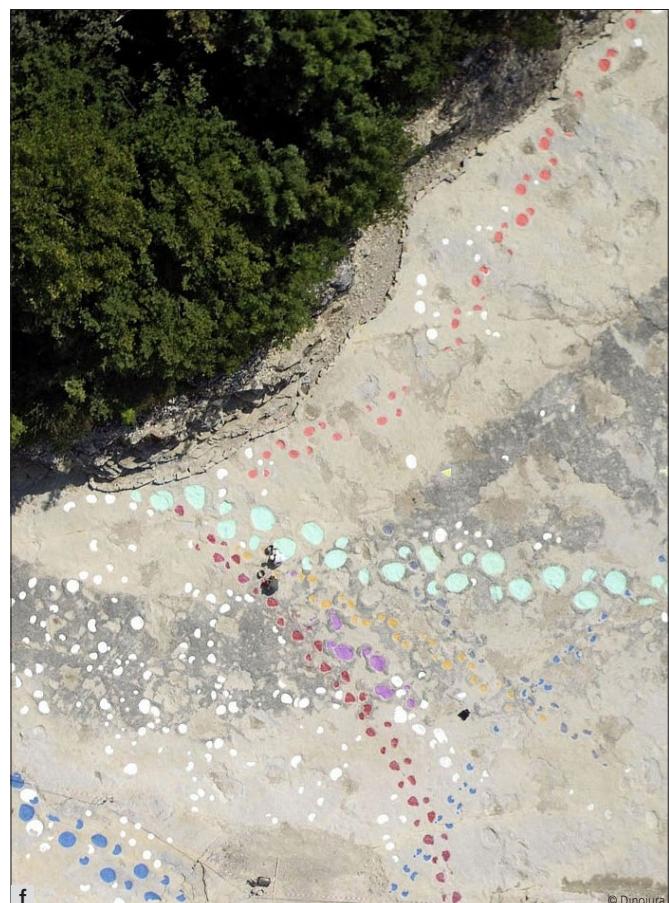
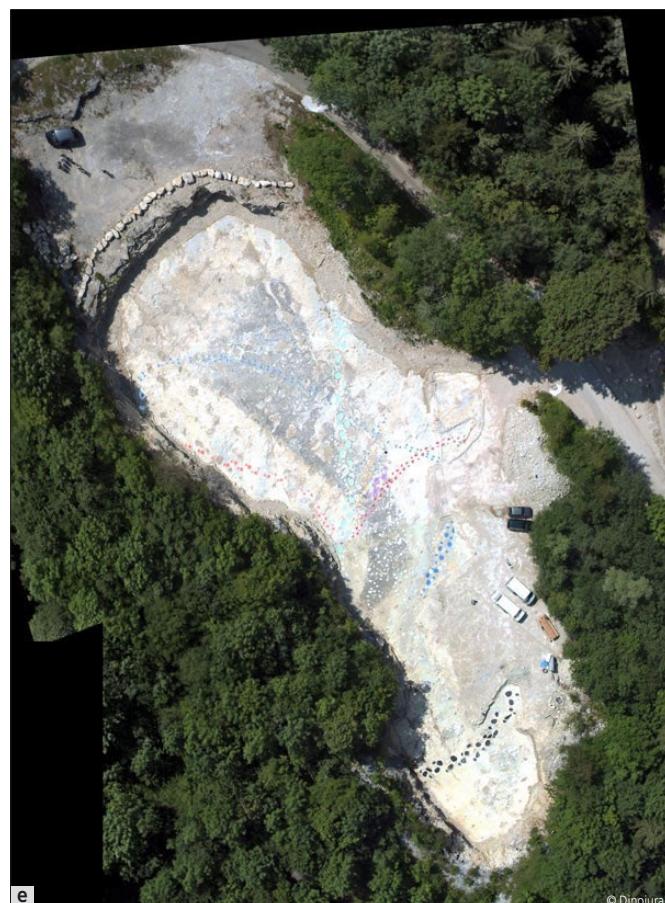


Fig. 9 (suite). e-f) Loulle (Jura, F, n° 28); g) Coisia (Jura, F, n° 26, quaternaire.unblog.fr/).

Les empreintes de sauropodes, découvertes en 2009, sont de très grande taille, atteignant 115 cm de diamètre total pour le pied (Mazin & Hantzpergue 2010, 2012). D'autres empreintes de sauropodes datées du Berriasien ont également été mises au jour dans le département de l'Ain (Crétacé inférieur) (Charollais et al. 2007). La présence répétitive de dinosaures du Jurassique supérieur au Berriasien semble ainsi avérée, ce qui peut être aisément corrélé avec les périodes d'émersion récurrentes sur la plateforme carbonatée jurassienne durant le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur, comme l'indique également l'enregistrement sédimentaire (p. ex. Remane 1991 ; Hillgärtner 1999 ; Colombié 2002 ; Hug 2003 ; Rameil 2005 ; Tresch 2007).

1.3 Paléontologie A16, découverte et documentation des empreintes de dinosaures

Avant les premières découvertes de la Paléontologie A16, des empreintes de dinosaures avaient déjà été observées dans le canton du Jura près de Glovelier, le long d'une route principale en construction en lien avec l'A16 (p. ex. Hostettler 1999 ; Tschudin 2001). Ces traces ont été brièvement mentionnées dans Lockley & Meyer (2000) mais n'ont pas encore fait l'objet d'une documentation, voire d'une étude détaillée.



Fig. 10. Courtedoux-Sur Combe Ronde: découverte des premières traces de dinosaures le long de l'A16, lors de sondages archéologiques et paléontologiques.

En février 2002, une campagne de sondages archéologiques et paléontologiques sur la commune de Courtedoux, au lieu-dit « Sur Combe Ronde », a révélé les premières traces de dinosaures en Ajoie (fig. 10). Ce site correspond à la première grande surface exploitée sur le tracé de la Transjurane par la Paléontologie A16. Des publications préliminaires, avec des pistes de sauropodes attribuées à l'ichnogenre *Parabrontopodus* et à des tridactyles de type théropode, ont été réalisées (Marty et al. 2003, 2004). À ce jour, plus de 14 000 traces découvertes sur 40 couches d'âges différents sont documentées et datées du Kimméridgien inférieur et supérieur (-152 Ma). Elles sont organisées en plus de 600 pistes de dinosaures.

Les sites à empreintes de dinosaures ont été découverts et fouillés sur le tracé autoroutier selon l'ordre chronologique suivant: Courtedoux-Sur Combe Ronde, Chevenez-Combe Ronde, Courtedoux-Tchâfouè, Chevenez-Crat, Courtedoux-Bois de Sylleux et Courtedoux-Béchat Bovais. La surface totale des couches documentées s'élève à quelque 18 500 m², avec une étendue allant de 230 à 4 300 m² pour chacune d'elles.

Dans la documentation ils sont généralement désignés selon un mode binomial: la commune concernée apparaît en premier, suivie par le lieu-dit (dans la plupart des cas). Chacun est donc codé par deux groupes de trois lettres majuscules, séparés par un trait d'union: CTD-SCR pour le site de Courtedoux-Sur Combe Ronde, par exemple.

Au final, au moins 90% des traces de dinosaures documentées ont été détruites ou recouvertes par la construction de l'A16. Les différents types de documentation scientifique (p. ex. relevés de terrain à différentes échelles, photographies, mesures des paramètres d'empreintes et de pistes, description des empreintes et des pistes, orthophotographies, balayages laser, moulages) sont donc les seuls témoignages subsistant de ce patrimoine paléontologique. Des dessins techniques informatisés ont été réalisés, à l'échelle 1:50, par scannage des relevés issus de la fouille. Ont ainsi été représentés, selon des standards définis, les empreintes et les pistes de dinosaures, ainsi que les failles.

Le travail de terrain achevé, les prélèvements ont été acheminés dans les laboratoires afin de dégager, stabiliser et conditionner les fossiles avant leur mise en collection (fig. 11 et 12). Afin de produire un ensemble cohérent de données, un système de gestion de bases de données relationnelles est en cours de réalisation, les logiciels classiques de bureautique ne permettant plus de traiter la masse des informations existantes (annexe 1).

Suite aux contrôles et inventaires, les données et les méthodologies appliquées sont présentées sous forme de catalogues (fig. 13). Ces tâches sont réalisées de manière consciente par des collaborateurs ayant participé à la documentation scientifique sur le terrain, ceci afin d'assurer un maximum d'homogénéité.

Ces documents sont produits en priorité pour les six grands sites principaux fouillés et étudiés sur le tracé de l'autoroute (fig. 13). Afin de planifier et de situer les emplacements les plus



Fig. 11. Stabilisation du fossile avant sa mise en collection.

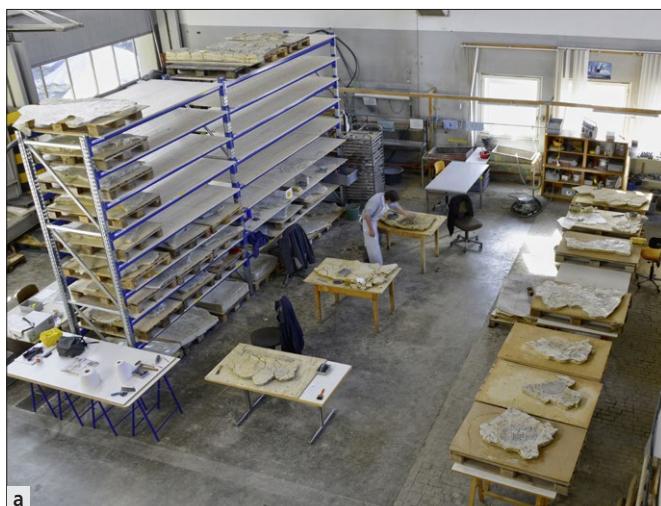


Fig. 12. Vues sur le travail de consolidation a) et le stockage b) des grands prélèvements à empreintes de dinosaures.

Nom du catalogue	Code	Ichnoassemblages (nb)	Surface (m ²)	Empreintes (nb)	Pistes (nb)
Contexte et méthode	-	-	-	-	-
Courtedoux - Béchat Bovais	CTD-BEB	6	8914	7076	217
Courtedoux-Bois de Sylleux	CTD-BSY	23	2720	2324	135
Courtedoux-Tchâfouè	CTD-TCH	17	2066	2226	169
Chevenez-Combe Ronde	CHE-CRO	8	1402	1223	84
Courtedoux-Sur Combe Ronde	CTD-SCR	12	3040	1004	38
Chevenez-Crat	CHE-CRT	4	268	234	20
hors tracé (PMM et CPP)		7	500	518	54
hors tracé (prospection et Glovelier)		9	270	-	-

Fig. 13. Étude des traces de dinosaures jurassiques.

intéressants pour une mise en valeur, dans le cadre du développement de Jurassica, des campagnes de sondages prospectifs (ouverture, détermination puis remblayage immédiat) avaient aussi été effectuées conjointement aux fouilles autoroutières. Il était en effet essentiel de déterminer, dans le terrain, la position exacte et les conditions d'exploitation de quelques strates définies. Le but principal était de prospector des zones non exploitées par la Paléontologie A16, afin de confirmer la présence et l'étendue des couches dignes d'un intérêt paléontologique. Deux autres catalogues, traitant de ces sites d'appoint découverts en dehors du tracé de l'autoroute étaient prévus, mais ne verront pas le jour faute de temps à disposition (fig. 13, hors tracé).



2 Situation géographique et géologique

Ce texte et les figures liées proviennent en grande partie des publications suivantes: Marty 2008, Comment et al. 2011; Comment & Paratte 2013.

Les premières observations lithologiques dans la chaîne du Jura remontent au XIX^e siècle (fig. 14). Cependant, la stratigraphie du Jurassique supérieur en Ajoie n'était définie jusqu'à très récemment que par une documentation limitée à de rares affleurements naturels, des forages isolés et quelques carrières (p. ex. Mouchet 1995; Gygi 2000a,b). Depuis le début des travaux de construction de l'autoroute Transjurane en 1987 (<http://www.a16.ch/historique/historic.htm>), de nombreux affleurements datés du Jurassique supérieur ont été mis au jour en Ajoie. Les fouilles paléontologiques et archéologiques réalisées par la SAP, les travaux autoroutiers, l'ouverture de nouvelles carrières et la réalisation de forages carottés ont conduit à une documentation géologique conséquente. Ces nouvelles données acquises grâce aux observations sur le terrain et en laboratoire ont permis de préciser l'évolution latérale des lithofaciès de la plateforme carbonatée de la fin du Jurassique (voir le catalogue *Stratigraphie du Jurassique supérieur*).

2.1 Généralités

Les 50 000 fossiles et les 14 000 traces de dinosaures dégagés à ce jour par la Paléontologie A16 proviennent de couches regroupées en trois grands ensembles: le Quaternaire (de -2,6 Ma à aujourd'hui), le Tertiaire (de -66 Ma à -2,6 Ma) et le Jurassique (de -200 Ma à -145 Ma) (fig. 15). Les différentes couches rencontrées lors de la construction de l'autoroute permettent de mieux appréhender la stratigraphie des plateaux d'Ajoie, restée longtemps mal établie en raison d'un manque ou de la mauvaise qualité des affleurements. Pour comprendre

la formation de la plupart des roches constituant l'Arc jurassien, il faut se projeter dans le Mésozoïque (de -251 Ma à -66 Ma). Cette ère se subdivise en trois périodes: le Trias, le Jurassique et le Crétacé.

Au Mésozoïque, le climat dans le Jura était considérablement plus doux (tropical) qu'à présent. Des forêts denses de résineux et de fougères arborescentes recouvrent de vastes régions. Les sous-bois se composent de prêles, de mousses ou d'autres plantes similaires sans floraison. Il y a 152 millions d'années, au Jurassique supérieur, le Jura est couvert d'une mer chaude et peu profonde qui s'avance et se retire régulièrement, laissant par endroits émerger des terres. Dans cette étendue d'eau, d'importants complexes récifaux s'implantent et d'épaisses couches de marnes et de calcaires s'accumulent, formées notamment d'innombrables débris d'organismes calcaires. Une faune diversifiée fréquentait ces côtes, représentée par des vertébrés – requins, poissons osseux, crocodiliens, tortues – et des invertébrés – ammonites, bivalves, gastéropodes, coraux et oursins. Des bois fossiles de type conifères, retrouvés principalement sous forme de branches (Philippe et al. 2010), constituent les seuls restes terrestres (voir les catalogues *Vertébrés* et *Plantes mésozoïques*).

En bordure de plage, les dinosaures règnent en maîtres et se déplacent en laissant des traces de leur passage. Grâce à la chaleur, ces empreintes sèchent et durcissent, permettant ainsi leur préservation. Lors de la marée suivante, ces traces sont recouvertes de sédiments. Ainsi protégées, elles se sont conservées et ont subsisté dans les sols actuels. Les mammifères sont de petite taille et très peu représentés; dans les airs, des reptiles volants (ptérosaures) planent à la recherche de poissons ou de charognes.

Thurmann (1832)	Marcou (1848)	Thurmann (1852) Thurmann & Etallon (1861-1864)	Contejean (1859)	Moesch (1867)	Greppin (1870)	Heim (1919)	Thalmann (1966)	Gygi (1995; 2000)	Jank (2004)	Comment et al. (2015)
Division Calcaires portlandiens	Marnes portlandiennes	Virgulien Zone virgulienne (Marnes à <i>Ostrea virgula</i>) Hypo-virgulien	Virgulien Calcaires à <i>Diceras</i> Calcaires et marnes à virgules Calcaires à <i>Macret</i> Calcaires à <i>Corbis</i>	Portlandien Platten-Kalke	Portlandien	Portlandien	Portlandien Twannbach-formation	Tithonien	Tithonien Formation de Riwabach	
Division Marnes kimméridgiennes	Calcaires kimméridgiens Marnes kimméridgiennes ou du Bannié	Pterocérien ou Strombien Zone pterocérienne (Marnes à Pterocères) Hypo-ptérocérien	Kimméridgien Pterocérien Calcaires à Pterocères sup. Marnes à Pterocères Calcaires à Pterocères inf.	Wettinger-Schichten Kimméridgien Badener-Schichten	Virgulien	Virgulien	Reuchenette-formation Formation de Reuchenette	Marnes à virgula Marnes du Bannié	Oyster Limestones Upper Grey and White Limestones Coral Limestones Virgula Marls Nerinean Limestones Bannié Marls Lower Grey and White Limestones Nautiliden-Schichten Thalassinoides Limestones	
Division Astartes	Calcaires séquanisiens	Epi-astarien Zone astarienne Hypo-astarien	Astarten Calcaires à <i>Cardium</i> Calcaires à Térébatules Marnes à Astartes Calcaires à <i>Natices</i> Calcaires à Astartes	Astarten Wangener-Schichten Séquanien	Séquanien	Séquanien	Ortoisen Formation de Courgenay	Formation de Porrentruy Membre de La May Membre de Bure Hauptnummenbank Membre de Röschenz		

Fig. 14. Synthèse de l'étude du Kimméridgien dans la littérature (modifié d'après Comment et al. 2011).

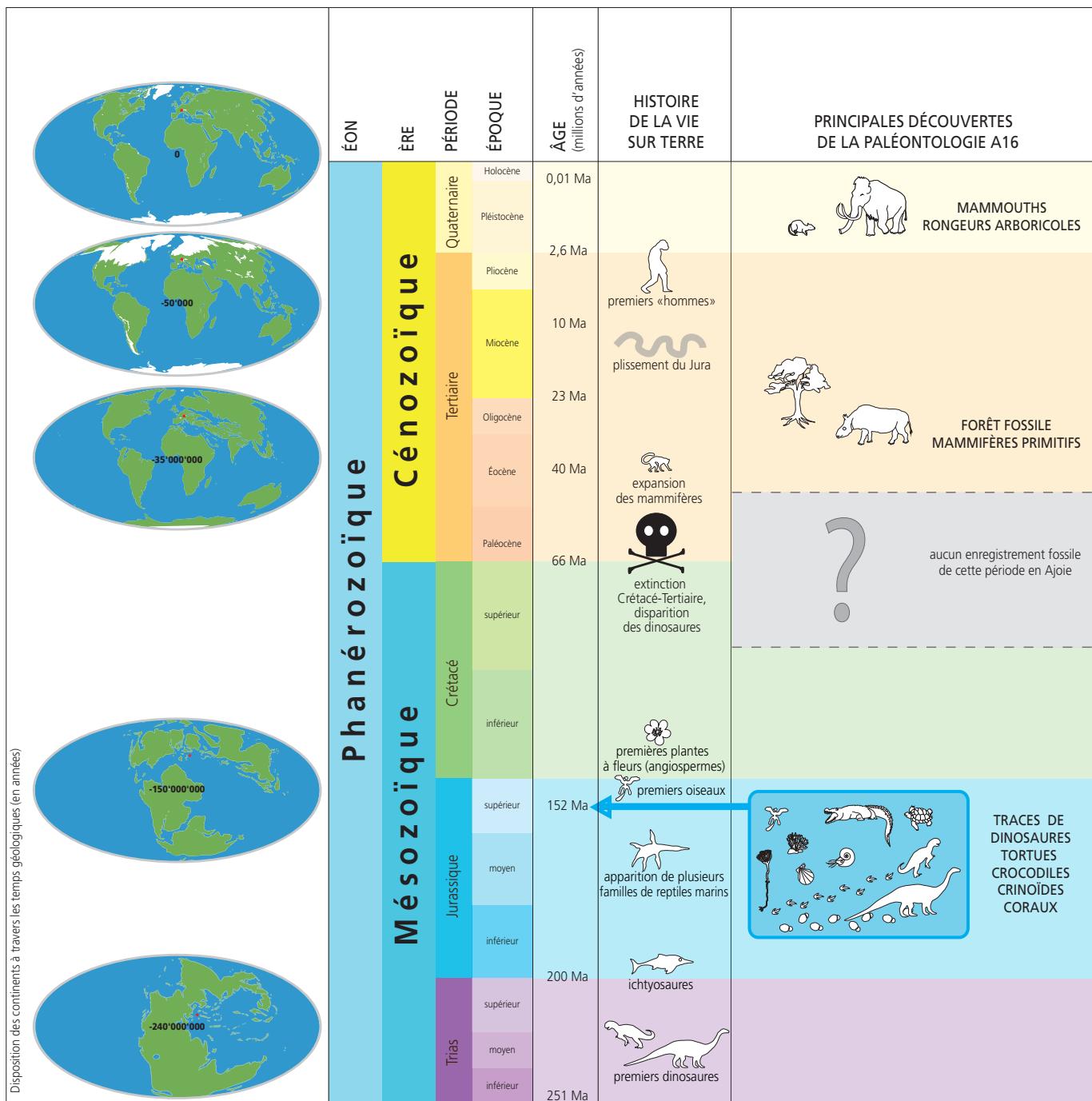


Fig. 15. Stratigraphie synthétique (Mésozoïque et Cénozoïque): paléogéographie, histoire de la vie sur Terre et principales découvertes de la Paléontologie A16 (Paratte 2012).

Dès le Crétacé supérieur, la mer se retire progressivement du Jura. Les couches récemment formées sont alors à l'air libre et par conséquent soumises à l'érosion, ce qui va effacer les indices de l'histoire de la vie jurassienne de cette période. Au moment du passage au Tertiaire, il y a 66 millions d'années, la Terre connaît la deuxième plus grande extinction de masse de son histoire. Environ 40% de tous les genres s'éteignent, parmi eux les dinosaures, les ptérosaures et les ammonites. Ils laissent ainsi la place aux mammifères, qui vont coloniser les milieux terrestre, marin et aérien. Quant à la formation des Alpes, elle résulte de la compression des plaques africaine et européenne qui débute vers 35 millions d'années.

2.2 Géographie et paléogéographie

Les sites à traces de dinosaures décrits dans cette étude ont été fouillés pendant une dizaine d'années en Ajoie, en lien avec la construction de l'autoroute A16 Transjurane. Cette région se situe à la transition entre les premiers plateaux subhorizontaux (Jura tabulaire) au nord et les derniers anticlinaux de la Haute-Chaîne (Jura plissé) au sud, dont les derniers plis sont localisés au sud de Porrentruy. Ce relief montagneux est très jeune à l'échelle géologique, formé entre environ -10 et -4 millions d'années; il résulte des derniers mouvements liés à la formation des Alpes (fig. 16).

Ce contexte offre une configuration intéressante: les couches présentent un pendage quasiment nul facilitant les recherches et l'étude des surfaces. Une caractéristique morphologique dominante de la région réside dans la présence de vallées sèches générées par la dissolution karstique (processus principal) et l'érosion fluviale (processus secondaire) le long des failles (Braillard 2006a,b). Cette karstification a également engendré un important réseau fluviatile souterrain, seuls trois petits cours d'eau superficiels pouvant être observés en Ajoie.

Au Jurassique supérieur («Malm»), la région jurassienne se présente sous forme d'un haut-fond séparant deux bassins océaniques, la Téthys au sud-est et le Bassin de Paris au nord-ouest. Les zones émergées principales, en général des massifs cristallins, se situent au nord-est (Massif de Londres-Brabant) et au sud-ouest (Massif central) (fig. 17). Durant cette période, la région de l'actuel Jura était une vaste plateforme carbonatée peu profonde protégée de la mer ouverte par une barrière plus ou moins continue de barres bioclastiques, oolithiques et récifales au sud-est (Enay et al. 1988). Elle se situait à une paléolatitude de 30°N environ (Ziegler 1988; Dercourt et al. 1994; Smith et al. 1994; Dercourt et al. 2000; Thierry et al. 2000). Les faciès sédimentaires du Jura durant l'Oxfordien et le Kimméridgien sont relativement diversifiés. L'éventail des dépôts s'organise entre la zone intertidale, le lagon et les barres récifales ou oolithiques, caractérisant une zone de transition (domaine subboréal) entre les domaines boréal et téthysien (Mouchet 1995; Colombié 2002; Colombié & Strasser 2003, 2005; Jank et al. 2006a-c; Keller 2006; Colombié & Rameil 2007).

2.3 Paléoenvironnement

D'importants complexes récifaux coralliens vont se développer durant l'Oxfordien (Dupraz 1999), avant l'installation de milieux plus confinés avec une salinité variable au Kimméridgien (Hug 2003; Colombié 2002). Les lithofaciès s'inscrivent dans un contexte de plateforme carbonatée progradante qui s'installe à l'Oxfordien supérieur et culmine au Kimméridgien terminal et au Tithonien.

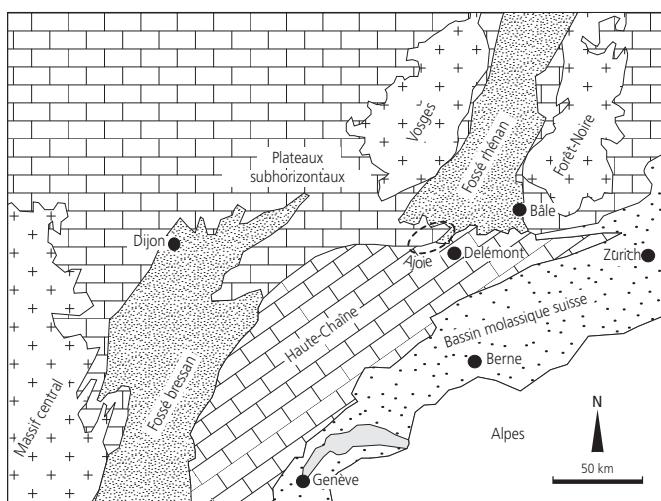


Fig. 16. Carte géologique générale de la région. L'Ajoie est mise en évidence par des traitillés (modifié d'après Comment & Paratte 2013).

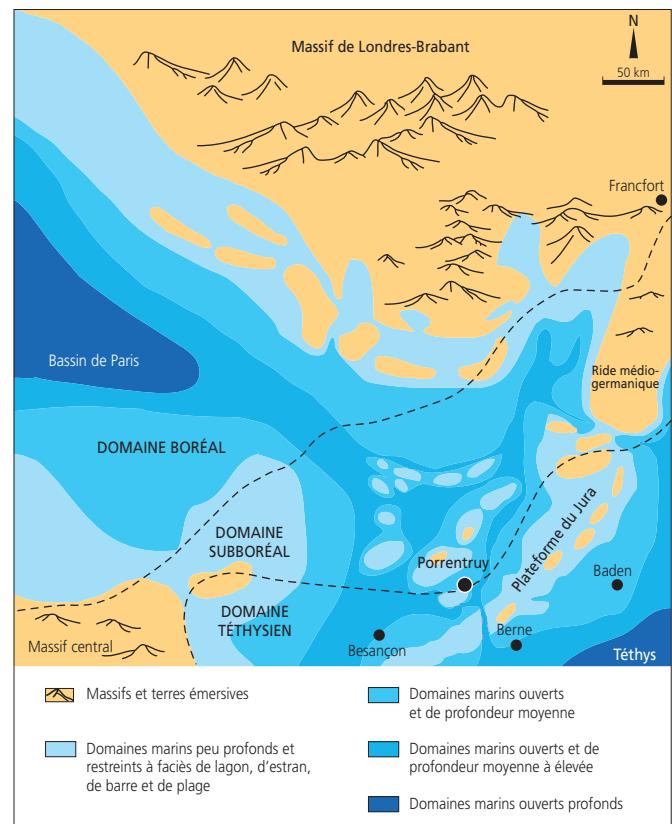


Fig. 17. Carte paléogéographique générale du Jurassique supérieur de la région étudiée (Comment & Paratte 2013).

Des lithofaciès de haute énergie périrécifaux et récifaux se succèdent; ils délimitent des bassins plus ou moins indépendants où s'établissent des conditions de plateforme protégée. En fonction des apports terrigènes liés aux changements du niveau marin et des conditions climatiques (Colombié & Strasser 2005), la plateforme développe des calcaires marins et parfois des récurrences marneuses (Chevallier 1989).

La puissance sédimentaire du Jurassique supérieur touché par la construction de l'A16 en Ajoie est estimée à environ 350m de strates accumulées, et s'étend de l'Oxfordien moyen (région de Buix et Boncourt) au Kimméridgien supérieur (région de Courtedoux, Chevenez et Porrentruy) (fig. 18). Cinq niveaux ont été étudiés de manière plus spécifique sur le tracé de l'autoroute. Contenus dans un intervalle stratigraphique de 50m d'épaisseur, ils représentent un temps total d'accumulation d'un million d'années environ. Cet intervalle appartient à la Formation de Reuchenette et s'étend chronologiquement des Marnes du Banné, à la base, aux Marnes à *virgula*, au sommet. Entre ces deux niveaux très fossilifères il y a le Membre de Courtedoux, connu pour sa richesse en traces de dinosaures (Marty 2008; Comment et al. 2011). Cette séquence atteste d'alternances de périodes prolongées d'émergence et d'immersion de la plateforme carbonatée jurassienne. Les premières analyses sédimentologiques des sites à traces de dinosaures suggèrent la présence de plusieurs environnements de dépôts juxtaposés, allant du lagon peu profond aux plages, aux plaines supratidales et aux marais (Marty & Strasser 2005). De telles zonations dans des

sédiments laminés ont été décrites à Shark Bay (Australie), dans le golfe Persique et aux Bahamas (p. ex. Logan et al. 1970; Purser 1973; Hardie 1977a). Dans des environnements de ce type, la préservation de traces de dinosaures dépend principalement de la nature des tapis microbiens superficiels et de la consistance du sédiment sous-jacent, ce qui peut également influencer la morphologie des empreintes. La présence récurrente de sites à traces dans l'Arc jurassien démontre des baisses répétées du niveau marin. Les dinosaures se seraient donc introduits dans le Jura par la Süddeutsche Schwelle (située à la marge sud-est du Massif de Londres-Brabant et du Massif rhénan) au nord-est ou depuis le Massif central au sud-ouest (Meyer & Lockley 1996; Meyer et al. 2006) (fig. 17).

2.4 Paléoclimat

Durant le Kimméridgien, le climat de la plateforme carbonatée jurassienne était subtropical et considéré généralement comme aride à semi-aride (p. ex. Hallam 1984, 1985; Frakes et al. 1992; Moore et al. 1992; Ross et al. 1992; Moore & Ross 1994; Weissert & Mohr 1996; Bertling & Insalaco 1998; Billon-Bruyat et al. 2005). Un contenu généralement faible en kaolinite dans les fractions argileuses de l'intervalle Marnes du Banné - Marnes à *virgula* soutient cette théorie (Marty 2008).

2.5 Contexte stratigraphique

Le district ajoulot est presque entièrement composé de roches sédimentaires attribuées aux Formations de Saint-Ursanne, Vellerat et Reuchenette, allant de l'Oxfordien au Kimméridgien tardif (p. ex. Gygi 1995, 2000a,b; Gygi et al. 1998).

La Formation de Reuchenette a été définie à l'origine par Thalmann (1966). En Ajoie, elle est la formation observée la plus récente et est constituée de plus de 140 m d'épaisseur de sédiments (Jank et al. 2006a). Le sommet de l'unité (Mésozoïque) est érodé et par endroits surmonté de couches cénozoïques et quaternaires.

Jusqu'à récemment, la stratigraphie de cette formation était encore mal comprise dans cette région faute de marqueurs biostratigraphiques (principalement les ammonites) et des mauvaises conditions d'affleurements (Gygi 2000a,b). Depuis le début de la construction de la Transjurane, plusieurs carrières, en plus des fouilles réalisées par la Paléontologie A16, ont permis la découverte d'un bon nombre d'ammonites. Elles ont conduit à l'établissement d'une biostratigraphie bien définie pour la Formation de Reuchenette du nord-ouest de la Suisse (Jank et al. 2006a-c; Comment et al. 2011).

Les ammonites découvertes permettent de placer l'intervalle des Marnes du Banné aux Marnes à *virgula* entre la fin du Kimméridgien inférieur et le début du Kimméridgien supérieur. Les laminites de l'intervalle inférieur se trouvent dans le Kimméridgien inférieur et celles des autres intervalles dans le Kimméridgien supérieur, quelque part entre les limites de séquences téthysiennes Kim3 et Kim4 (Hardenbol et al. 1998) (fig. 18).

2.5.1 Membre du Banné

Marnes du Banné

Décrivé vers 1840 dans les environs de Porrentruy par Jules Thurmann (Thurmann 1832; Thurmann & Etallon 1861-1864), ce niveau appelé Marnes à ptérocorès du Banné, épais de 5 à 11 m en Ajoie, forme le Membre du Banné (Gygi 2000a,b). Ces dépôts ont été colonisés par divers organismes que l'on retrouve aujourd'hui sous forme de fossiles. Les Marnes du Banné présentent une faune extrêmement riche en invertébrés: bivalves, gastéropodes, brachiopodes, oursins, etc. Des restes d'ossements de vertébrés (tortues, crocodiles, etc.) et des dents (crocodiles, poissons, etc.) peuvent y être découverts, mais la probabilité est plus faible (voir les catalogues *Vertébrés mésozoïques*). Ces sédiments se sont déposés jadis dans un environnement de type lagon peu profond (~10m), au sein d'une plateforme carbonatée parcourue de chenaux. Sur le terrain, les variations du niveau marin peuvent être observées par une alternance de couches très marneuses et d'autres plus calcaires. Les premières se sont déposées lors d'une augmentation du niveau marin et, par conséquent, dans une phase d'inondation de la plateforme, permettant la distribution plus ou moins homogène de sédiments argileux provenant des massifs cristallins du Nord. Les secondes se sont, elles, accumulées durant une phase où les apports sédimentaires étaient moins importants et la production de calcaire plus forte.

En direction de la Vallée de Delémont et du Jura bernois, la puissance de cette unité géologique diminue et est réduite à une fine couche fossilifère d'environ 2 m, et perd progressivement son caractère marneux.

2.5.2 Membre de Courtedoux (Comment et al. 2011)

Le Membre de Courtedoux, d'une épaisseur de 35 m, n'est presque constitué que de couches calcaires (fig. 19). Le profil, décrit en détail, correspond à la synthèse de plusieurs leviers de coupe réalisés sur le plateau de Courtedoux. La carrière de Chevenez-La Combe (CHE-CHV) permet l'observation de la quasi-totalité du Membre de Courtedoux; seuls les premiers mètres font défaut.

Cette unité débute par des bancs calcaires massifs déposés sur les marnes du Membre du Banné. Ces couches sont très riches en gastéropodes (nérinées) recristallisés. Divers bivalves et des terriers sont également présents.

Faciès d'émerison

Toutes les traces de dinosaures découvertes en Ajoie par la Paléontologie A16 proviennent de la Formation de Reuchenette et sont contenues entre les Marnes du Banné (Membre du Banné sensu Gygi 2000a,b) et les Marnes à *virgula* (Membre des *virgula* sensu lato Gygi 2000a,b; *Virgula* du Nord chez Jank et al. 2006a; Marnes à *Virgula* dans Jank et al. 2006b; Membre à *Virgula* inférieur dans Colombié & Rameil 2007). Les différentes couches ont été numérotées dans l'ordre et, si possible, de la plus vieille à la plus jeune (excepté dans les Marnes du Banné), de manière à pouvoir indiquer, lors du prélèvement et de la documentation d'un fossile, le niveau stratigraphique correspondant.

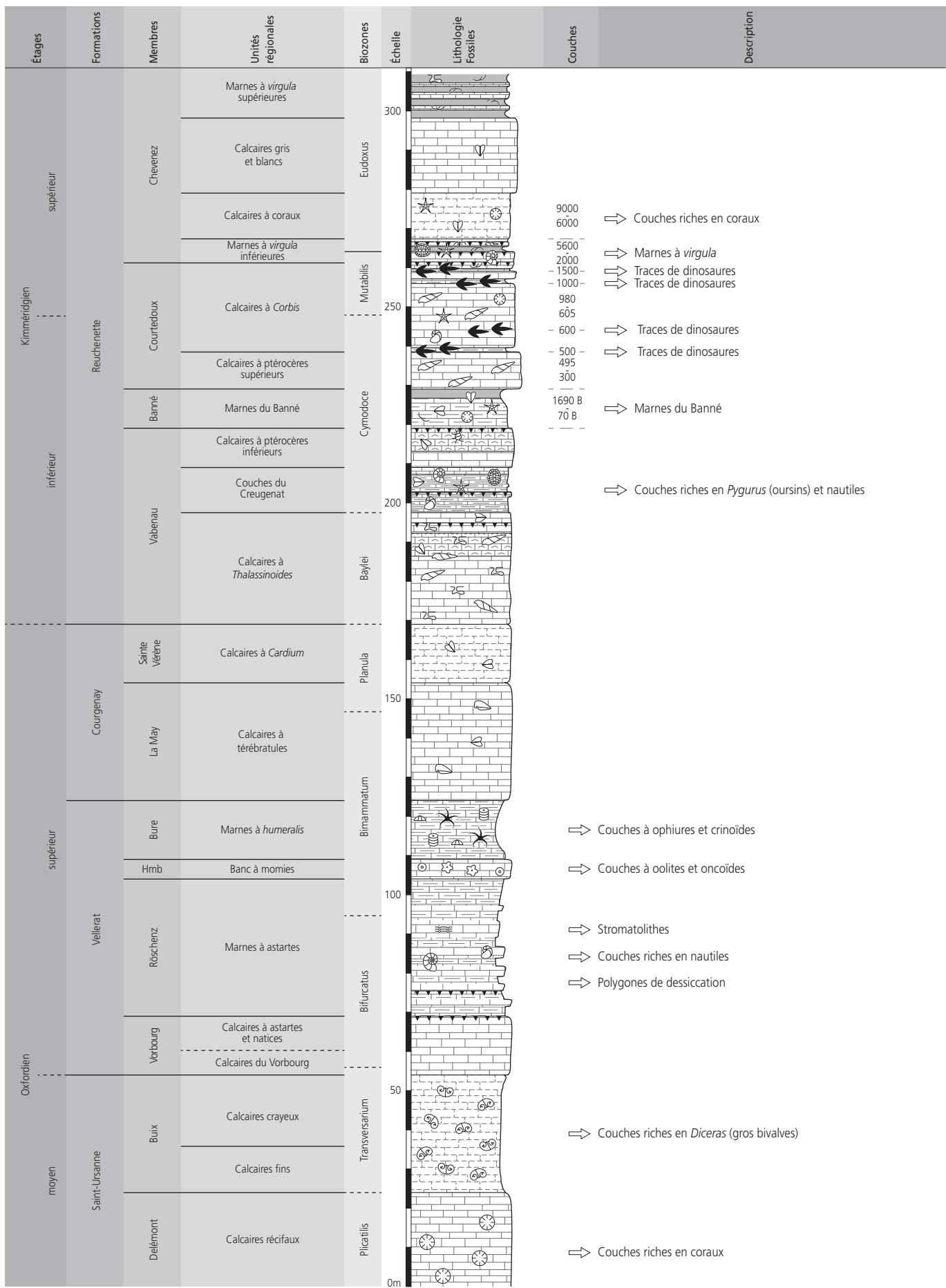


Fig. 18. Coupe lithostratigraphique synthétique simplifiée de l’Oxfordien et du Kimméridgien en Ajoie, (Comment et al. 2015).



Fig. 19. Coupe lithostratigraphique dans les Membres de Courtedoux et de Chevenez (modifiée d'après Comment et al. 2015).

Une quarantaine de niveaux à traces sont répartis en trois intervalles principaux (inférieur, intermédiaire et supérieur), d'une épaisseur de 40 à 100 cm chacun. Constitués de calcaires finement feuilletés dénommés *laminites* (biolaminites), ils ont préservé les empreintes de pas de dinosaures et traduisent un apport rythmique des sédiments sous l'action de la croissance des tapis microbiens et des marées. Ils ont été déposés sur une dalle compacte à la base. Par sa nature calcaire, cette dernière est plus stable et moins friable, et comporte généralement plus d'empreintes bien conservées. Elle constitue le niveau le plus fiable pour comparer les différents sites fouillés (fig. 20). Un intervalle peut présenter plus de quinze surfaces à traces et semble correspondre à une voire deux séquences d'environ 20 000 ans au cours desquelles les dinosaures ont été présents, de manière récurrente (Marty 2008).

Le premier niveau, l'intervalle inférieur (le plus vieux, fig. 20, bleu), se situe environ 10 m au-dessus des Marnes du Banné (Marty 2008; Marty et al. 2003, 2010). La numérotation des couches qui le composent, définie de manière subjective par la Paléontologie A16, s'étend de 500 à 550, dernière couche émersive de ce « paquet » de laminites d'une épaisseur de 60 cm environ. Les premiers mètres sus-jacents sont caractérisés par un calcaire assez grossier et entrecoupé de quelques fines alternances marneuses. Trois mètres au-dessus de la dalle 500, plusieurs surfaces contenues dans un intervalle calcaire laminé ont été observées, la couche 600 à Béchat Bovais et les couches 580, 590 et 600 (fig. 20, violet) dans la carrière de Chevenez la Combe en 2016. Il semble d'après les lamination que toutes les surfaces comprises entre la 580 et la 630 pourraient potentiellement présenter des empreintes.

Cet intervalle n'a pas été décrit avant 2016, car jusque-là, seule une surface, la 600 avait été découverte, elle était considérée comme surface unique et rien ne laissait présager que d'autres couches à traces étaient potentiellement présentes dans les couches sur- et sous-jacentes. Les couches suivantes sont moins laminées et deviennent peu à peu crayeuses et blanchâtres. Les bancs peuvent atteindre jusqu'à 1 m d'épaisseur. Le contenu fossifile reste sensiblement le même (bivalves, gastéropodes, échinodermes), mais les formes fossiles sont de plus en plus grandes et nombreuses (bivalves, gastéropodes, échinodermes). Plus haut, une couche (830) très finement laminée (calcaires lithographiques) a été documentée à plusieurs endroits sur le plateau de Courtedoux mais n'a jamais présenté de traces de dinosaures ou d'autres indices d'émergence.

L'intervalle intermédiaire, d'une épaisseur de 80 à 100 cm (couches 1000-1100, fig. 20, vert), se situe 16 m au-dessus de l'intervalle inférieur (couches 500-550). Des calcaires très massifs et riches en gastéropodes (nérinées) surmontent ces alternances marnocalcaires sur une épaisseur de 3 m environ (Waite et al. 2008).

Un dernier horizon émersif, l'intervalle supérieur d'une épaisseur de 20 cm environ (couches 1500-1650, fig. 20, rouge), constitue le niveau à empreintes de dinosaures le plus récent connu en Ajoie.

Au-dessus, plus d'un mètre de calcaires massifs toujours très riches en nérinées et en bivalves sont interrompus par une croûte ferrugineuse de type hardground (sol durci). Sous cette surface remarquable se trouve un horizon très bioturbé, riche en nérinées, oursins, huîtres et serpules (couche 2000) (Waite et al. 2013).

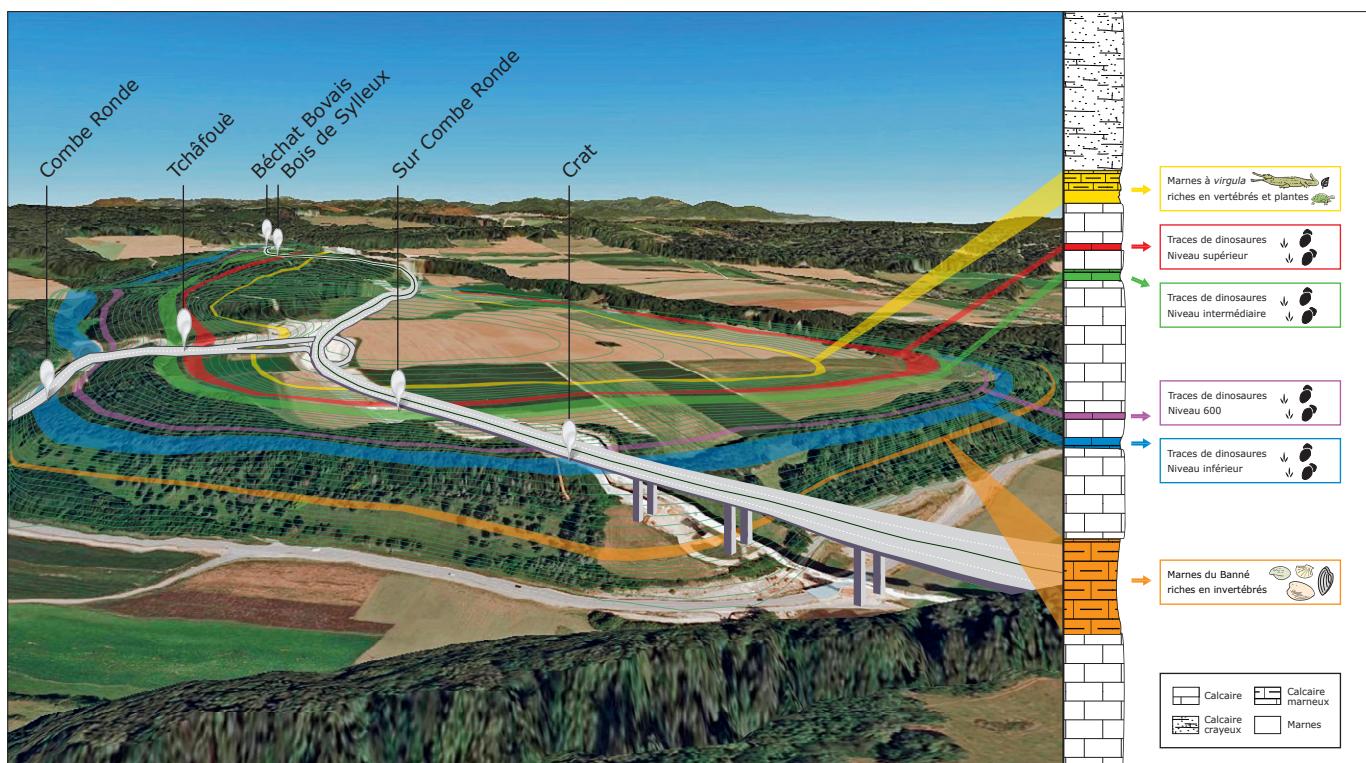


Fig. 20. Profil stratigraphique de la région de Courtedoux et Chevenez (Kimméridgien); les six sites à traces fouillés sur le tracé de l'A16 sont mis en évidence (Paratte 2012).

Elle est surmontée de 2 m d'alternances marno-calcaires fossilières, riches en dents de poissons, ammonites, oursins, bivalves, gastéropodes et restes de vertébrés. Cet ensemble est entrecoupé par plusieurs sols durcis. Finalement, un banc calcaire d'environ 80 cm d'épaisseur est surmonté par un hardground (4000) bien développé et colonisé par de nombreux bivalves. Cet horizon marqueur se situe à la base du faciès des Marnes à *virgula* inférieures qui achèvent la séquence, 5 m au-dessus de l'intervalle à traces le plus récent (fig. 20).

Il est intéressant de noter ici que les niveaux à traces de dinosaures de Glovelier ont été retrouvés au-dessous et au-dessus des Marnes du Banné (Tschudin 2001; Jank et al. 2006b); toutefois la corrélation avec les intervalles à traces de l'Ajoie n'est pas clairement établie à l'heure actuelle.

2.5.3 Membre de Chevenez (Comment et al. 2015)

Marnes à *virgula*

Les Marnes à *virgula* ont été décrites pour la première fois au XIX^e siècle (Thurmann & Etallon 1861-1864; Contejean 1859). Ces marnes tirent leur nom de l'abondance des petites huîtres qu'elles renferment, les *Exogyra virgula*, renommées depuis *Nanogyra virgula* dans la littérature scientifique. *Nanogyra nana*, une autre huître de plus petite taille, est retrouvée en plus faible quantité (Koppka 2015). L'abondance de ces fossiles dans ces sédiments n'est pas encore clairement expliquée. Il est question de savoir si ce milieu est un lieu de vie pour ces organismes ou s'ils ont été transportés après leur mort; ils ne présentent toutefois que de très rares marques de transport sur leur coquille, appuyant ainsi la première hypothèse. Cette formation s'étend sur une épaisseur d'environ 3 m et recouvre un sol durci de composition calcaire qui marque la séparation avec le Membre de Courtedoux. Localement, la répartition géographique des Marnes à *virgula* inférieures concerne, en France, la région de Montbéliard et, en Suisse, les régions de

Porrentruy (Contini & Hantzpergue 1973; Jank et al. 2006), du Jura bernois et neuchâtelois (Strasser 2007; Waite 2010). Il n'est pas aisément de comprendre la présence ou l'absence de cet horizon et les mécanismes de dépôts qui le régissent. Une hypothèse est que le confinement final soit contrôlé par les courants marins et par la morphologie de la plateforme, les marnes se déposant de préférence dans des dépressions (Comment et al. 2011). Ces marnes sont très riches en restes de vertébrés: poissons cartilagineux et osseux, crocodiliens, et surtout tortues (Marty & Billon-Bruyat 2004; Billon-Bruyat 2005). De nombreux invertébrés marins ont également été mis au jour, incluant des oursins, bivalves et ammonites. La seule présence avérée de restes continentaux se trouve sous la forme de quelques restes de ptérosauriens (reptiles volants) et surtout de bois fossiles, représentés essentiellement par des branches et par quelques troncs de conifères primitifs (Philippe et al. 2010), confirmant la proximité de la terre ferme. Les Marnes à *virgula* se seraient donc déposées dans un environnement lagunaire marin côtier, dont les eaux sont peu profondes et chaudes, où cohabitait une faune marine diversifiée. Elles s'étendent sur une épaisseur de 3 m en moyenne et constituent la base du Membre de Chevenez qui n'affleure malheureusement pas en totalité dans la région étudiée (voir les catalogues Vertébrés mésozoïques).

2.5.4 Biostratigraphie

Une grande quantité d'ammonites ont été découvertes dans le Membre de Courtedoux, notamment dans les derniers mètres du profil jusqu'au hardground 4000, correspondant pour la plupart à *Orthaspidoceras schilleri*. *Lithacoceras* sp. et *Aspidoceras* sp. ont été identifiées environ 3 m en dessous de la limite supérieure du Membre de Courtedoux (Comment et al. 2015). Ces découvertes correspondent toutes à la zone à *Mutabilis* du domaine boréal. De façon générale, cette zonation biostratigraphique par les ammonites est également confirmée par la zonation des ostracodes (Schudack et al. 2013).

3 Travail de terrain

3.1 Techniques de fouille

Dix ans de fouilles intensives ont suivi la découverte, en 2002, des premières empreintes de dinosaures sur le tracé autoroutier. La Paléontologie A16 a ainsi développé, durant ses années d'activité, un savoir-faire unique en matière de techniques de fouille et de documentation de terrain systématique des sites à traces de dinosaures.

Pour connaître la géologie régionale et repérer les niveaux fossilières, une prospection des carrières et des affleurements naturels intervient avant d'entreprendre une fouille. Des sondages archéologiques et paléontologiques systématiques sont ensuite effectués afin de rendre accessibles et observables les différents horizons du sous-sol (fig. 21). Si la richesse est confirmée, des objectifs scientifiques sont définis et des moyens humains et logistiques sont mis en place.



Fig. 21. Sondages réalisés à la pelle mécanique.



Fig. 22. Décapage mécanique des couches sus-jacentes.

La première étape de travail consiste à évacuer à la pelle mécanique les couches intéressantes jusqu'à atteindre les premières couches susceptibles de révéler des empreintes de dinosaures (fig. 22). Les 40 niveaux à traces sont répartis en trois intervalles principaux, chacun d'une épaisseur de 40 à 100 cm et constitué de fines couches de calcaires marneux plaquettés (laminites) déposées sur une dalle principale compacte, plus vieille (fig. 23). Par sa nature calcaire, elle est plus stable, moins friable et comporte souvent des empreintes et des pistes bien conservées. Elle constitue le niveau le plus fiable pour corrélérer les différents sites fouillés.

La main humaine prend ensuite le relais. Le décapage manuel s'effectue alors, couche après couche, à l'aide de marteaux, de burins, de pieds de biche et de brouettes (fig. 24). Le premier niveau à traces est fouillé sur une superficie maximale délimitée par la zone de recherche autorisée selon le tracé autoroutier

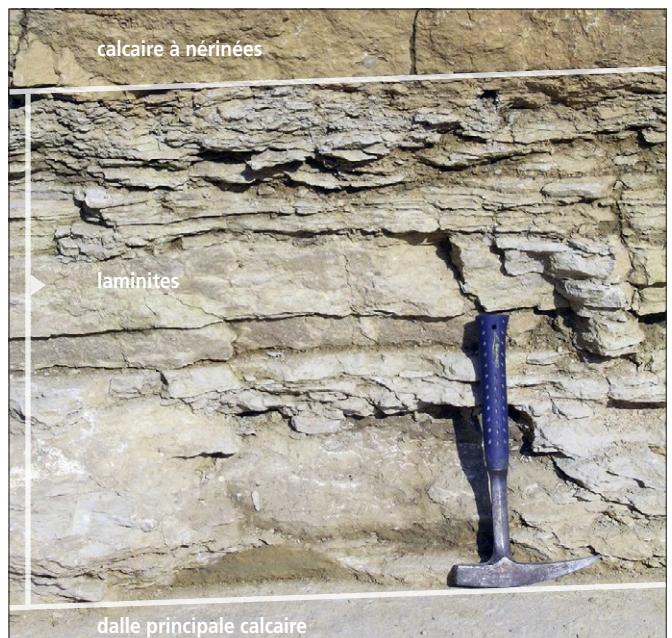


Fig. 23. Profil des couches.



Fig. 24. Décapage manuel couche par couche.

(fréquemment plus de 1000 m²). Cette phase nécessite un effort majeur vu l'étendue mais aussi l'épaisseur ou la résistance de la couche enlevée. Après un nettoyage fin, la recherche, l'interprétation et la documentation des empreintes peut débuter. Ces dernières sont alors identifiées, mises en évidence sur la roche avec de la craie, voire de la peinture, puis numérotées; pour faciliter la tâche, cette opération est régulièrement effectuée de nuit à l'aide de projecteurs, ce qui permet d'accentuer le relief et d'améliorer la lisibilité des empreintes (fig. 25). Vient ensuite l'analyse détaillée des surfaces, afin de collecter un maximum d'informations avant leur disparition sous l'autoroute (fig. 26).

Un processus de documentation systématique a été élaboré dans cette optique. Le relevé des failles, des limites de couches et des empreintes de dinosaures (généralement à l'échelle 1:20; chap. 6.3.1) s'effectue sur l'intégralité de la surface, grâce à l'installation d'un carroyage de 2 m sur 2 m (fig. 29). Chaque empreinte et chaque piste (une piste étant la succession d'au moins trois empreintes appartenant à un même individu) sont ensuite photographiées, décrites et mesurées selon plusieurs

paramètres (taille et rotation des traces, longueur des pas et des enjambées, largeur de la piste, etc.; chap. 6.1.4). Un lever de coupe stratigraphique, des descriptions sédimentologiques et des prélèvements d'échantillons de sédiments complètent les données de chaque site.

Si l'épaisseur de la couche n'est pas trop importante, les meilleures empreintes sont ensuite prélevées grâce à une nouvelle méthode mise au point (chap. 6.2.4); elle consiste en un encollage des surfaces, par application d'une colle (Mowilith) et de fibre de verre, permettant une extraction facilitée de grandes zones (fig. 27). Si la strate est trop épaisse pour un prélèvement, des moussages en silicone sont alors réalisés afin de produire ultérieurement des copies en fibre de verre (chap. 6.2.3). Les traces, originales ou copiées, sont ainsi conservées et restent en collection à la disposition des chercheurs (fig. 28). Pour les niveaux les plus intéressants, un balayage laser et des orthophotographies sont effectués par des entreprises externes fournissant un rendu informatique en trois dimensions (chap. 6.5.1-2) (fig. 30 et 31) (voir les catalogues *Traces de dinosaures jurassiques*, liasses 1).



Fig. 25. Courtedoux-Béchat Bovais: vue nocturne de pistes de saurodopes.



Fig. 27. Courtedoux-Tchâfouè: prélèvement d'empreintes.



Fig. 26. Mise en évidence des empreintes avec de la peinture.



Fig. 28. Courtedoux-Tchâfouè: moulage d'empreintes.

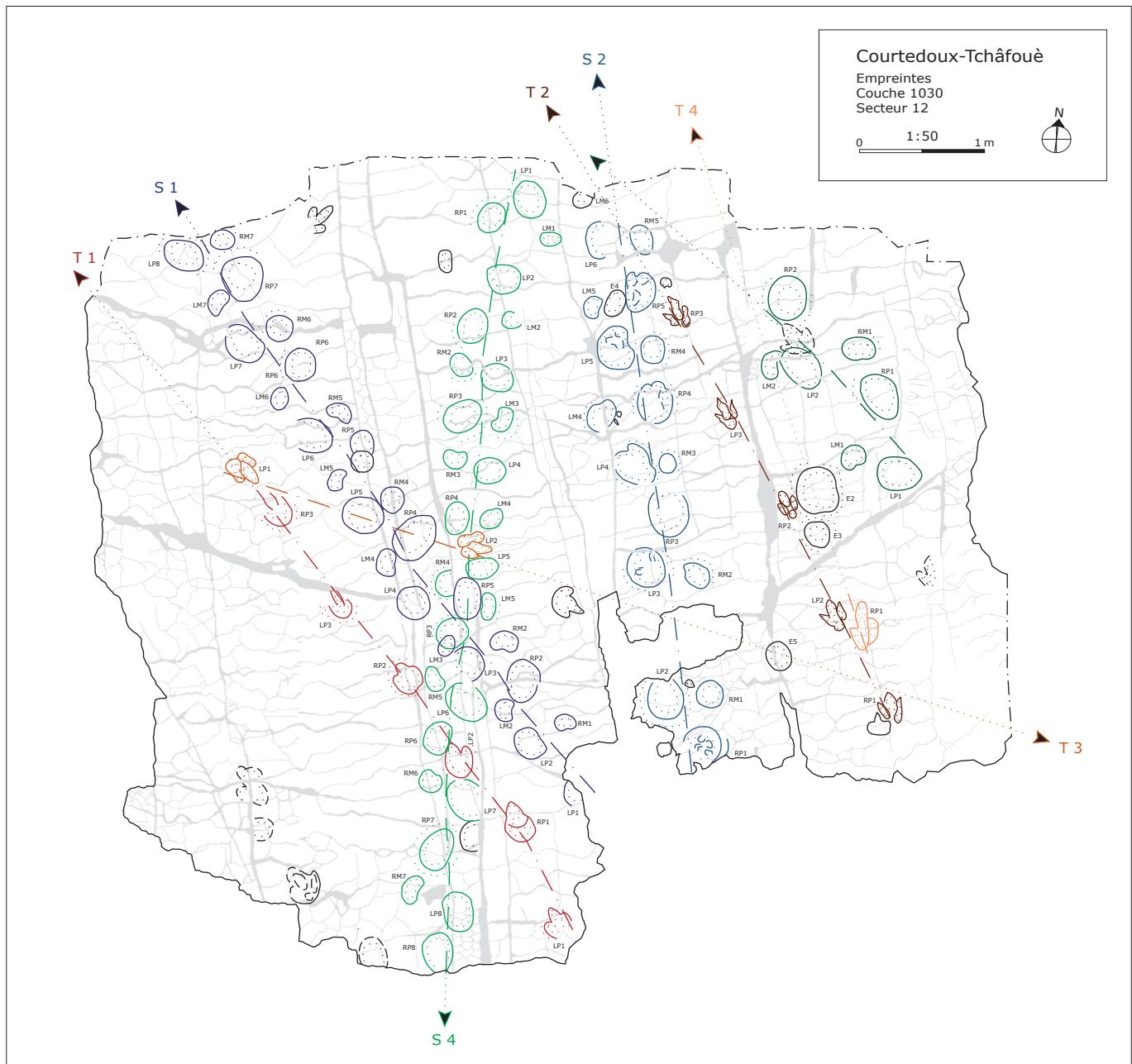


Fig. 29. Courtedoux-Tchâfouè: plan vectorisé.

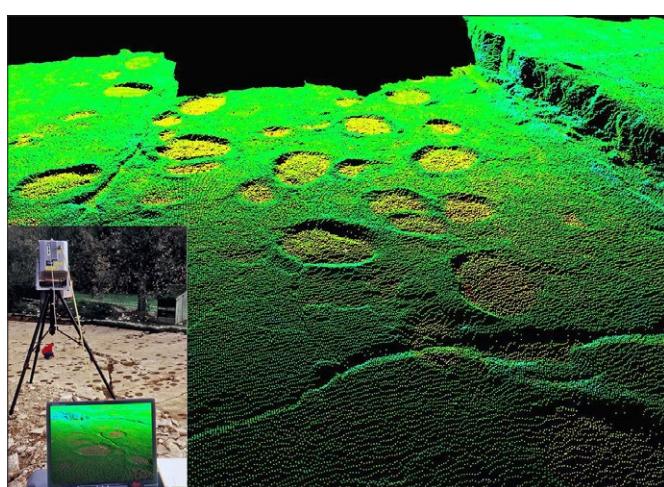


Fig. 30. Courtedoux-Sur Combe Ronde: balayage laser (Terradata SA).

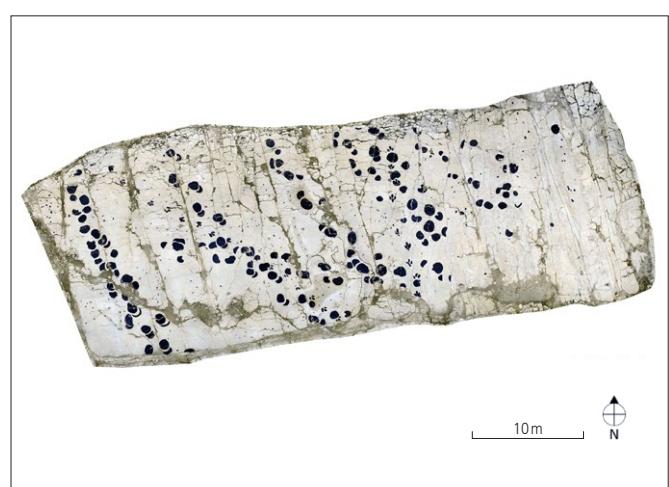


Fig. 31. Courtedoux-Bois de Sylleux: orthophotographie (Flotron SA).

De la préparation à la collection

Les prélèvements de terrain sont acheminés dans les laboratoires selon leur finalité : à la préparation-conservation pour dégager, stabiliser et conditionner les fossiles, ou au centre technique pour le tamisage et la recherche des microfossiles. Certains échantillons sont envoyés dans différents laboratoires en fonction du type d'analyse désiré (minéralogie, isotopes, palynologie, etc.). Une fois préparés et conditionnés, les fossiles sont mis en collection (fig. 32).



Fig. 32. Mise en collection des prélèvements de traces de dinosaures.

Toutes les informations de terrain seraient rapidement inutilisables sans une méthode d'archivage soigneuse. Afin de produire un ensemble cohérent de données, une équipe s'occupe d'établir et de maintenir des règles communes à tous. Dans ce but, différents ensembles de documents ont été conçus (nomenclatures, standards, procédures, référentiels, etc.); pour une accessibilité optimale, ils sont majoritairement numérisés et rangés au sein d'une architecture documentaire commune. Un système de gestion de bases de données relationnelles est en cours de réalisation (annexe 1).

3.2 Topographie et carroyage

La topographie permet la mesure, puis la représentation sur un plan ou sur une carte, de formes et de détails visibles sur le terrain. L'objectif est de déterminer la position et l'altitude de n'importe quel point situé dans une zone donnée, en définissant lesdits points en coordonnées rectangulaires x, y et z, à partir de coordonnées polaires relevées sur le terrain (angles horizontaux et verticaux, distances).

Lors de la mise en place d'une fouille, comme pour toute activité paléontologique *in situ*, il est obligé d'avoir des indications sur la localisation dans l'espace des objets qui seront mis au jour. De plus, pour assurer une lecture optimale des informations, les sites doivent pouvoir être situés dans leur contexte géographique, en rapport avec le tracé de l'autoroute A16 (fig. 33). La topographie permet également de représenter l'évolution d'une fouille dans le temps.

Localisation d'un site de fouille

Afin de définir l'emplacement d'un site par rapport à un système géoréférencé, les géomaticiens utilisent les coordonnées nationales de repères géodésiques calculés et répertoriés par la Section de l'aménagement du territoire de la République et Canton du Jura (points fixes). Il est ainsi possible de superposer l'emprise des sites de fouille au tracé de l'autoroute, établi par les ingénieurs en charge du projet de construction.

Ces points fixes planimétriques (PFP) forment un cadre de référence spatial pour tout travail de mensuration officiel. En Suisse, les réseaux cantonaux s'inscrivent dans un réseau fédéral qui couvre l'ensemble du pays. Ils sont matérialisés sur le terrain par des repères fixes (bornes, chevilles, pyramides, etc.) et documentés (fichiers de données, fiches signalétiques et cartes des points) (fig. 34 et 35).

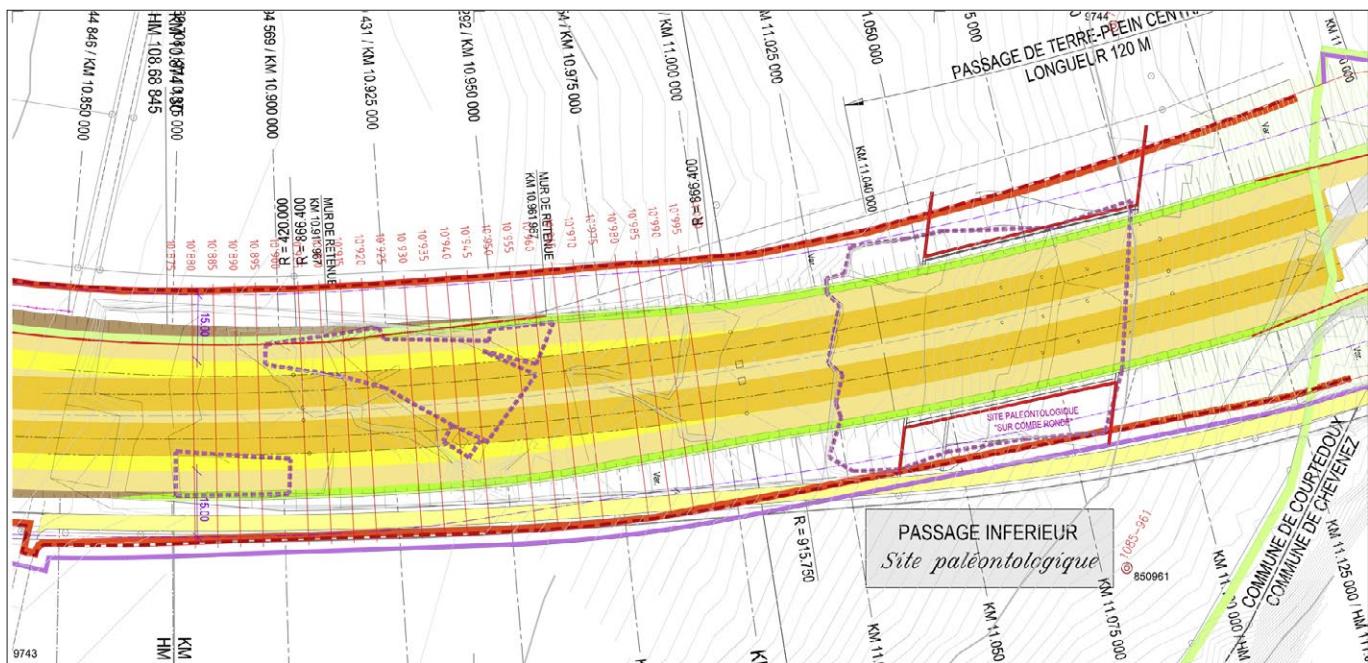


Fig. 33. Détail d'un plan de situation à l'échelle 1 : 500, avec les fouilles de la PAL A16 (en pointillé violet) (km 10,875 - km 11,000; Section des constructions routières).

JURA 16 CH RÉPUBLIQUE ET CANTON DU JURA										
DÉPARTEMENT DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ÉQUIPEMENT SERVICE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE CADASTRE ET GÉOMATIQUE										
PFP A16, section 8										
Section	No point	Y	X	Z	H plaque	Mise à jour	Type	Remarque	Lien fiche	Lien GéoPortail
8	7017	594444.534	244447.127	425.841	427.994	mai 2011	tour		Lien fiche	Lien sur le GéoPortail
8	7019	595330.966	244483.917	425.5431	427.627	mai 2011	tour		Lien fiche	Lien sur le GéoPortail
8	7020	595649.522	243850.552	432.454	434.096	mai 2011	tour		Lien fiche	Lien sur le GéoPortail
8	7021	595578.765	243402.817	439.7516	441.844	mai 2011	tour		Lien fiche	Lien sur le GéoPortail
8	7030	595688.226	243646.568	437.8614	438.946	mai 2011	tour		Lien fiche	Lien sur le GéoPortail
8	7031	595717.708	243786.217	434.2676	435.401	mai 2011	tour		Lien fiche	Lien sur le GéoPortail
8	7033	595666.275	243409.811	441.7124	443.721	mai 2011	tour		Lien fiche	Lien sur le GéoPortail

Points fixes de la section 8

Fig. 34. Extrait d'un fichier de données des points fixes planimétriques de l'autoroute A16 (section 8; Service de l'aménagement du territoire).

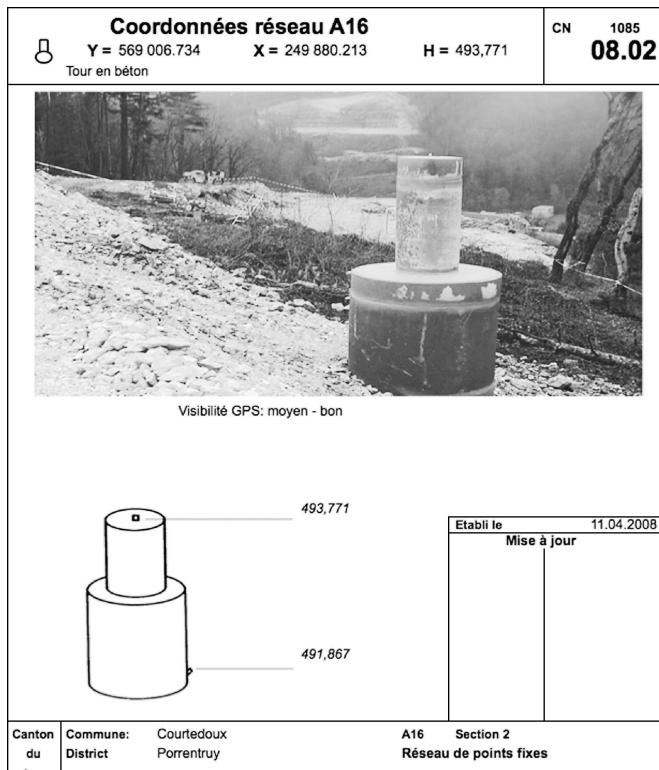


Fig. 35. Fiche signalétique d'un point fixe (tour n° 08.02, section 2; Service de l'aménagement du territoire).

Lors des travaux de terrain, une première étape consiste à acquérir des données spatiales au moyen d'appareils de précision, tel le théodolite (fig. 36). Cet instrument permet une mesure des angles dans les deux plans horizontal et vertical, afin de déterminer une direction et une distance. Les données ont d'abord été retranscrites de façon manuelle, avant que l'évolution des outils ne permette, dès 2011, le transfert des données directement du théodolite à l'ordinateur. Les contours de l'objet topographié sont alors reportés sur des fichiers informatisés et, si nécessaire, adaptés par la suite (agrandissement de l'emprise de la fouille, p. ex.)

En plus de la mesure du périmètre géoréférencé, que l'on nomme emprise, chaque site se voit attribuer une paire de coordonnées nationales suisses (abscisse et ordonnée), situées en son milieu.



Fig. 36. Courtedoux-Vâ Tche Tchâ: prise de mesures au théodolite.

Une seconde étape consiste à définir le nom des différents sites fouillés. Le choix du bureau de géomatique s'est porté sur la juxtaposition de deux codes de trois lettres. Le premier correspond au nom de la commune sur laquelle les sondages ou les fouilles ont été réalisés; il s'agit d'un choix relativement arbitraire, Courtedoux devenant CTD, par exemple. Le second code est le plus souvent défini à partir d'un nom de lieu-dit, d'un ouvrage de l'autoroute A16 ou d'un bâtiment. Le lieu-dit Tchâfouè devient ainsi TCH, le tunnel de Bure TLB et le Centre professionnel de Porrentruy CPP.

Les différentes surfaces topographiées sont désignées sous le terme d'*unités*. Elles sont définies en sous-catégories selon qu'elles correspondent à une coupe (C), à un forage (F), à un affleurement (A) ou à un secteur (S). Chacune de ces unités est, de plus, différenciée selon une conjonction de critères (géographique ou chronologique, p. ex.), et porte un numéro attribué par le Système d'information documentaire (SID) de la Paléontologie A16 (fig. 37). La nature de l'objet topographié détermine le nombre de coordonnées spatiales assignées. Sur les sites à traces de dinosaures, les différents types d'objets topographiés sont mesurés en trois dimensions; il s'agit des activités de terrain en général, à savoir l'emprise des sites, les unités de fouille et les installations de chantier. Les mesures en deux dimensions concernent dans la majorité des cas les relevés de terrain sur monofilms, réalisés à l'échelle 1:1. L'indication de la direction du nord y est mentionnée au moyen d'une flèche (fig. 38).

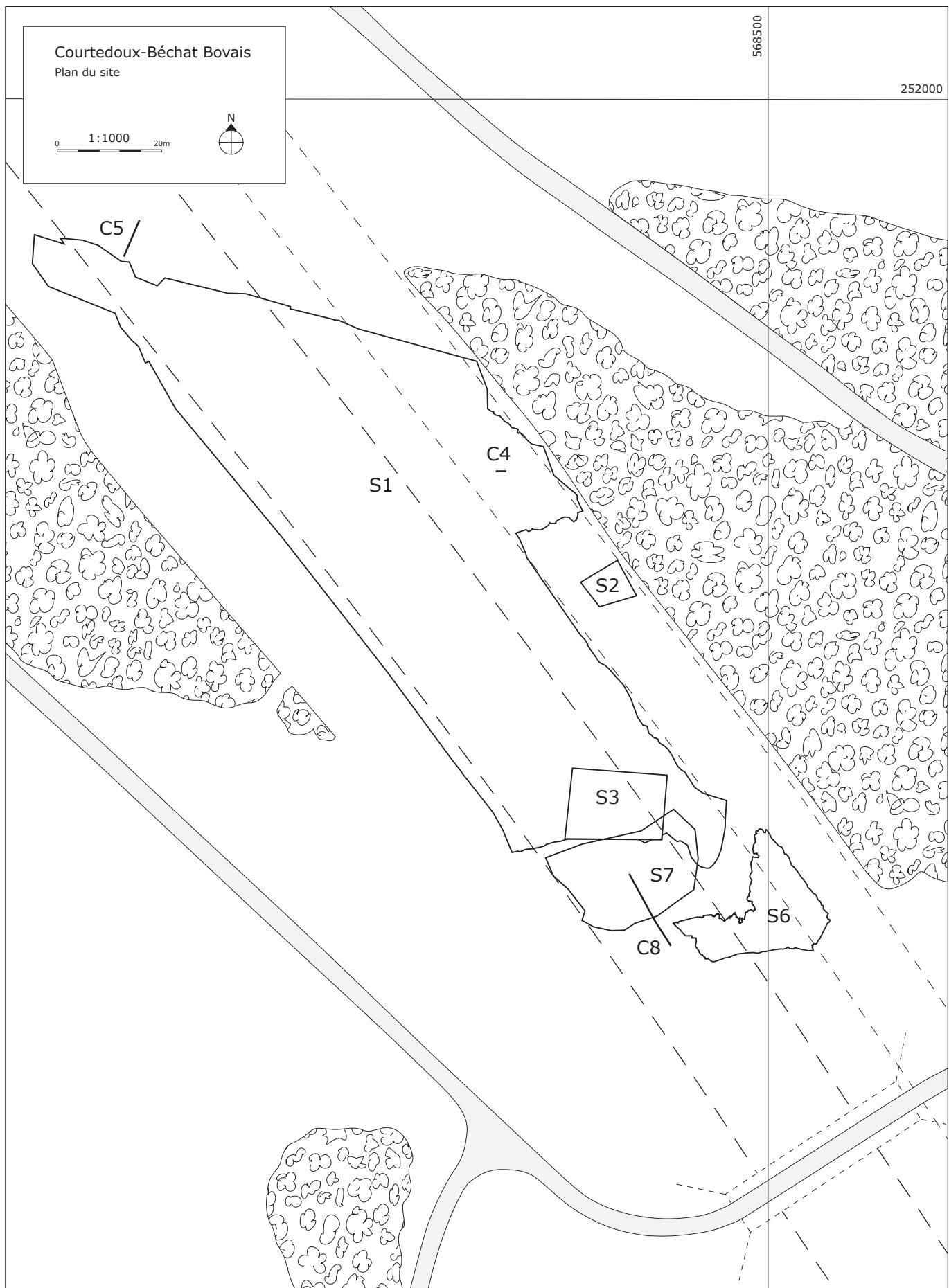


Fig. 37. Courtedoux-Béchat Bovais: plan du site à l'échelle 1:1000, avec numérotation des secteurs de fouille.

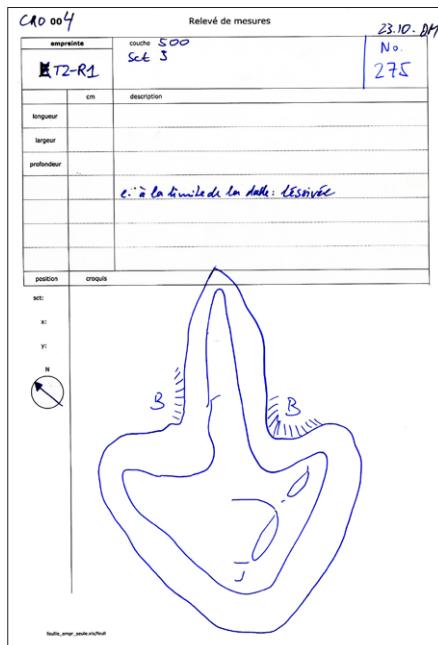


Fig. 38. Chevenez-Combe Ronde: monofilm, avec indication du nord (CRO004-r275).

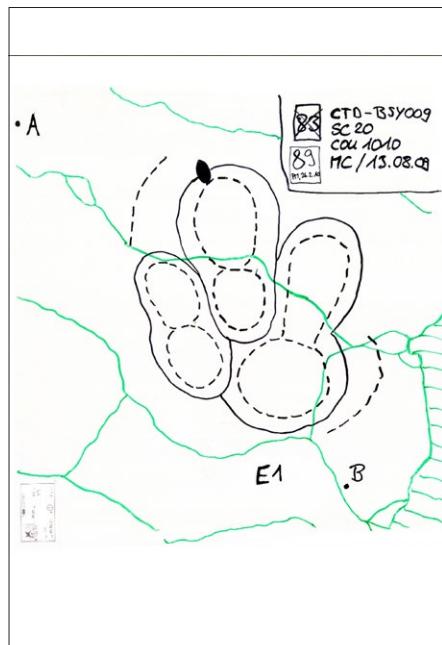


Fig. 39. Courtedoux-Bois de Sylleux: relevé de terrain, avec axe de dessin AB (BSY009-r89).

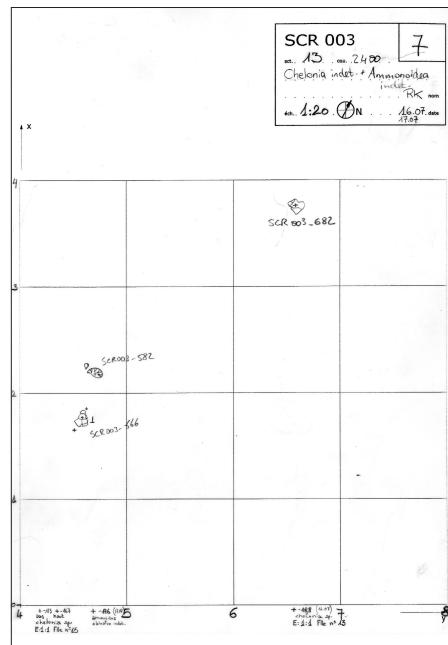


Fig. 40. Courtedoux-Sur Combe Ronde: relevé de terrain, avec indications d'altitude (SCR003-r7).

Concernant les relevés sur papier de type Polymat – généralement à l'échelle 1:20, plus rarement à l'échelle 1:10 – un axe de dessin AB peut être topographié (fig. 39). Dans la plupart des cas, cependant, les relevés sont référencés par rapport à un système de coordonnées locales. De plus, une flèche indiquant la direction du nord est insérée dans le cartouche d'en-tête.

Comme pour les relevés, les données topographiques des objets prélevés ont également été acquises par rapport à un système de coordonnées locales (dimensions x et y). Dans le cas de découverte intéressante, l'altitude a également été mesurée à l'aide d'une lunette laser (dimension z). Toutes ces informations permettent, au final, de clarifier le travail accompli et de suivre l'évolution spatiale du site au cours du temps (fig. 40).

Implantation de coordonnées locales

Pose d'un carroyage

Le carroyage est une technique de quadrillage utilisée en topographie. Elle consiste à délimiter une surface en carrés identiques et localisés, ce qui permet de rassembler et de traiter des données en vue d'une exploitation cartographique ou statistique. L'utilisation de ce système de délimitation du terrain est variée. En paléontologie, le carroyage permet de cartographier le périmètre des fouilles et de localiser l'endroit d'où ont été extraits les objets.

Sur les sites de fouille paléontologique, un système de coordonnées locales a été mis en place, avec pour objectif de rendre plus aisée la saisie des géoréférences de chaque prélèvement et de chaque relevé. Les axes du carroyage sont installés en fonction de la forme du secteur en question. En principe, un seul système de coordonnées locales est implanté par secteur.

La première étape consiste à installer, au moyen d'une chevillière et selon le théorème de Pythagore, deux axes principaux (x et y) qui seront ensuite topographiés. Ces axes feront office de référence pour l'implantation du carroyage. La distribution spatiale des points du maillage s'effectue en principe au moyen d'une chevillière pour des surfaces de petite taille, et d'un théodolite pour les plus grandes. Selon la nature du sol, les points sont circonscrits (localisés) par des clous ou par des vis, et reliés entre eux par du fil élastique.

Dans le cas de grandes surfaces, le réseau mis en place représente un maillage de 10 m sur 10 m. Un second tramage, plus fin, est défini par un marquage de la surface tous les 2 m, et réalisé au moyen d'une peinture en bombe aérosol (fig. 41).



Fig. 41. Courtedoux-Bois de Sylleux: installation d'un carroyage à l'aide d'une chevillière.

4 Sédiméntologie

4.1 Levers de coupe

Pour le scientifique, le fossile en tant que tel, isolé de son contexte, n'apporte qu'un nombre limité d'informations s'il ne peut être replacé dans un contexte stratigraphique et sédimentologique.

Le lever de coupe est une représentation graphique schématique de la succession des couches lithologiques d'un affleurement (fig. 42). Les différents niveaux sont numérotés et décrits, leur épaisseur mesurée. En paléontologie, le but principal de cette technique est de pouvoir repérer le plus précisément possible les fossiles prélevés; elle permet, en premier lieu, de replacer le fossile dans son contexte. L'étude d'un affleurement autorise parfois de reconstituer les conditions de dépôt des sédiments, les conditions de fossilisation ou encore les conditions paléoécologiques locales. Toutes ces informations, confrontées à celles portées par les fossiles eux-mêmes, permettent de formuler des hypothèses sur l'interaction entre les organismes fossiles et leur environnement d'origine.

Le recalage stratigraphique sert également à dater les couches géologiques aussi précisément que possible.



Fig. 42. Relevé stratigraphique dans une carrière.

Le découpage biostratigraphique est d'autant plus fin si les fossiles indices ou bons marqueurs stratigraphiques y sont précisément indiqués. Le repérage de ces derniers sur le lever de coupe apporte aussi des éléments sur leur succession relative, dans le temps, et permet de formuler des hypothèses sur leur évolution.



Fig. 43. Profil stratigraphique dans la carrière de Chevenez-La Combe; les niveaux principaux étudiés lors des fouilles paléontologiques sont mis en évidence.

Hors de son contexte sédimentaire, sans repérage précis au sein de sa coupe d'origine (et donc sans lever de coupe), un fossile n'est au mieux, bien souvent, qu'un bel objet ayant perdu une partie considérable de l'information paléontologique qu'il aurait pu livrer (Bert & Bersac 2011).

Dans le but de comprendre l'évolution des paléoenvironnements, les microfaciès, le contenu en macrofaune ou en microfaune, ainsi que les cortèges minéraux, sont documentés et étudiés. De ce fait, des comparaisons sont possibles entre les différents sites de la région et à plus large échelle afin de corrélérer et de contrôler les évolutions latérales des lithofaciès. De plus, les données acquises permettent de mieux connaître les couches géologiques et d'ainsi pouvoir évaluer le potentiel de celles-ci dans des phases de prospection (fig. 43).

4.1.1 Fouilles et leviers de coupe

La description macroscopique des lithofaciès, le relevé des limites de bancs et de leurs épaisseurs, ainsi qu'un lever stratigraphique et une documentation photographique, ont été systématiquement réalisés sur un maximum d'affleurements ajoulots. Ceci pour affiner les corrélations entre les différents sites étudiés et pour contrôler les évolutions latérales des lithofaciès (fig. 44). De nombreux niveaux sédimentaires caractéristiques – par exemple des surfaces à traces de dinosaures ou des sols durcis – sont utilisés comme repères lithostratigraphiques. Les corrélations biostratigraphiques sont basées sur l'identification des nombreux spécimens d'ammonites découverts et les biozones correspondantes (Enay et al. 1971 ; Hardenbol et al. 1998), et confirmées par des données d'ostracodes (Schudack et al. 2013).

Deux types de données principales ont été exploités. D'une part des profils géologiques inédits, issus des affleurements mis au jour en partie par les travaux autoroutiers A16 et en partie par l'exploitation récente de carrières régionales et d'autre part la documentation détaillée de niveaux lithostratigraphiques, mis au jour par les fouilles de la Paléontologie A16 permettent un contrôle des variations latérales de lithofaciès sur des emprises importantes (voir le catalogue *Stratigraphie du Jurassique supérieur*).

4.1.2 Problématique des leviers de coupe

L'accessibilité des affleurements peut parfois engendrer quelques problèmes. En effet, l'avancée rapide des travaux autoroutiers laisse souvent peu de temps pour la documentation des coupes stratigraphiques. Certains niveaux sont par ailleurs inatteignables du fait de leur position trop haute sur l'affleurement. De plus, une attention particulière doit être apportée à la sécurité sur des chantiers actifs ou dans des carrières en cours d'exploitation ou de remblaiement.

Par endroits, l'échantillonnage de certains niveaux est difficile et nécessite des traitements particuliers. Les prélèvements, destinés à la réalisation de lames minces dans les niveaux argileux, sont compliqués : un traitement du sédiment à l'aide de résine peut, par exemple, être appliqué afin d'en assurer la stabilité.

4.1.3 Procédés

Afin d'optimiser les conditions de sécurité, les interventions de la Paléontologie A16 se font dans la mesure du possible durant les pauses des chantiers ou durant les vacances des entreprises. Pour être averti de l'avancée des travaux ou de l'ouverture d'un nouvel affleurement, une bonne communication avec les entrepreneurs est essentielle. Dans les carrières, le suivi des affleurements conjointement aux activités d'exploitation est nécessaire afin de profiter des éventuels paliers mis au jour ou de remblayages permettant d'atteindre des niveaux inédits.

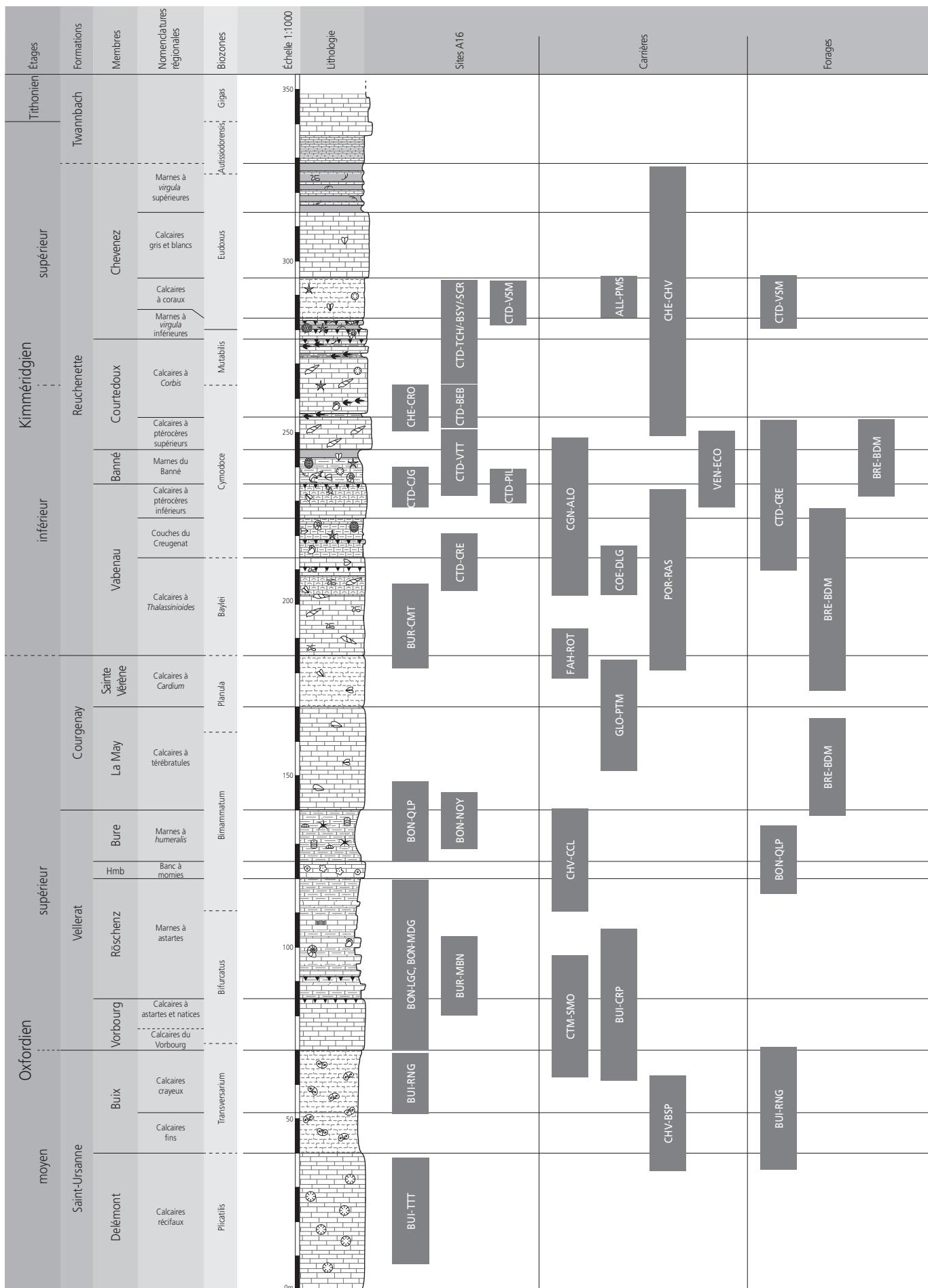
La procédure standard traite en général la coupe de sa base à son sommet. Un dessin à l'échelle 1:20 est réalisé, avec relevé des informations suivantes : stratigraphie (étage, formation, membre), épaisseur, numérotation des couches et des prélèvements, contenu fossilifère, lithologie (classification de Dunham 1962 et Folk 1962), structures, observations générales (fig. 45). Les limites de bancs sont systématiquement observées et une documentation photographique est souvent réalisée. Deux échantillons sont à chaque fois prélevés : l'un pour la réalisation de lames minces, l'autre pour divers types d'analyses.

Dans le cadre particulier de certains chantiers de fouille, différentes surfaces doivent être décrites de manière très précise. C'est le cas notamment pour les surfaces à traces de dinosaures. Afin d'optimiser les corrélations entre les mêmes niveaux à empreintes sur des sites différents (fig. 47), il a été indispensable de mettre en place une description sédimentologique ciblée de chacune des couches fouillées (fig. 46). Dans la mesure du possible, un relevé stratigraphique détaillé additionné d'un échantillonnage systématique dans l'intervalle de laminites a également été réalisé.

Durant la phase suivante intervient des analyses minéralogiques par diffraction RX et l'étude des microfaciès en lames minces grâce à un microscope, en complément des observations faites sur le terrain.

Fig. 44. Coupe lithostratigraphique de l'Ajoie, avec localisation des principaux sites étudiés. Trois d'entre eux concernent le Membre de Vabœuf : BUR-CMT, CTD-CRE et CGN-ALO. Un profil complémentaire a été réalisé dans le Membre du Banné : CTD-VTT. Un à la limite entre le Membre de Vabœuf et le Membre du Banné : CTD-CJG. Sept recoupent des niveaux du Membre de Courtedoux : CTD-VTT, CTD-BEB, CHE-CRO, CTD-TCH, CTD-BSY, CTD-SCR et CHE-CHV. Le membre le plus récent de la Formation de Reuchenette n'a pas été documenté en entier, surtout pour les niveaux situés au-dessus de la couche des Marnes à virgula inférieures. Cinq sites ont été étudiés, définissant une partie de cette unité : CTD-TCH, CTD-GCH, CTD-VSM, ALL-PMS et FAH-ROT (Comment et al. 2011).

ALL-PMS, Allé-Pré Monsieur	COE-DLG, Cœuve-Dos Longeau
BON-LGC, Boncourt-Grandes Combles	CTD-BEB, Courtedoux-Béchat Bovais
BON-MDG, Boncourt-Mont Dgèneaux	CTD-BSY, Courtedoux-Bois de Sylleux
BON-QLP, Boncourt-Queue au Loup	CTD-CJG, Courtedoux-Combe Jeunes Gens
BRE-BDM, Bressaucourt-Montaigne	CTD-CRE, Courtedoux-Creugenan
BUI-CRP, Buix-Crepes	CTD-GCH, Courtedoux-Grands Champs
BUI-RNG, Buix-Rang	CTD-PIL, Courtedoux-Pilay
BUI-TTT, Bure-Tchouatte	CTD-SCR, Courtedoux-Sur Combe Ronde
BUR-CMT, Bure-Champs Montants	CTD-TCH, Courtedoux-Tchâfoué
BUR-MBM, Bure-Montbion	CTD-VSM, Courtedoux-Vies Saint Martin
BUR-NOY, Bure-Noyer	CTD-VTT, Courtedoux-Vâ Tche Tchâ
CGN-ALO, Courgenay-Alombré	CTM-SMO, Courtemaîche-Sur Montené
CHE-CHV, Chevenez-La Combe	FAH-ROT, Fahy-Rotte
CHE-CRO, Chevenez-Combe Ronde	GLO-PTM, Glovelier-Petite Morée
CHV-BSP, Courchavon-Bois de Sapin	POR-RAS, Porrentruy-Rasse
CHV-CCL, Courchavon-Combe Cécile	VEN-ECO, Vendlincourt-Ecorchevez



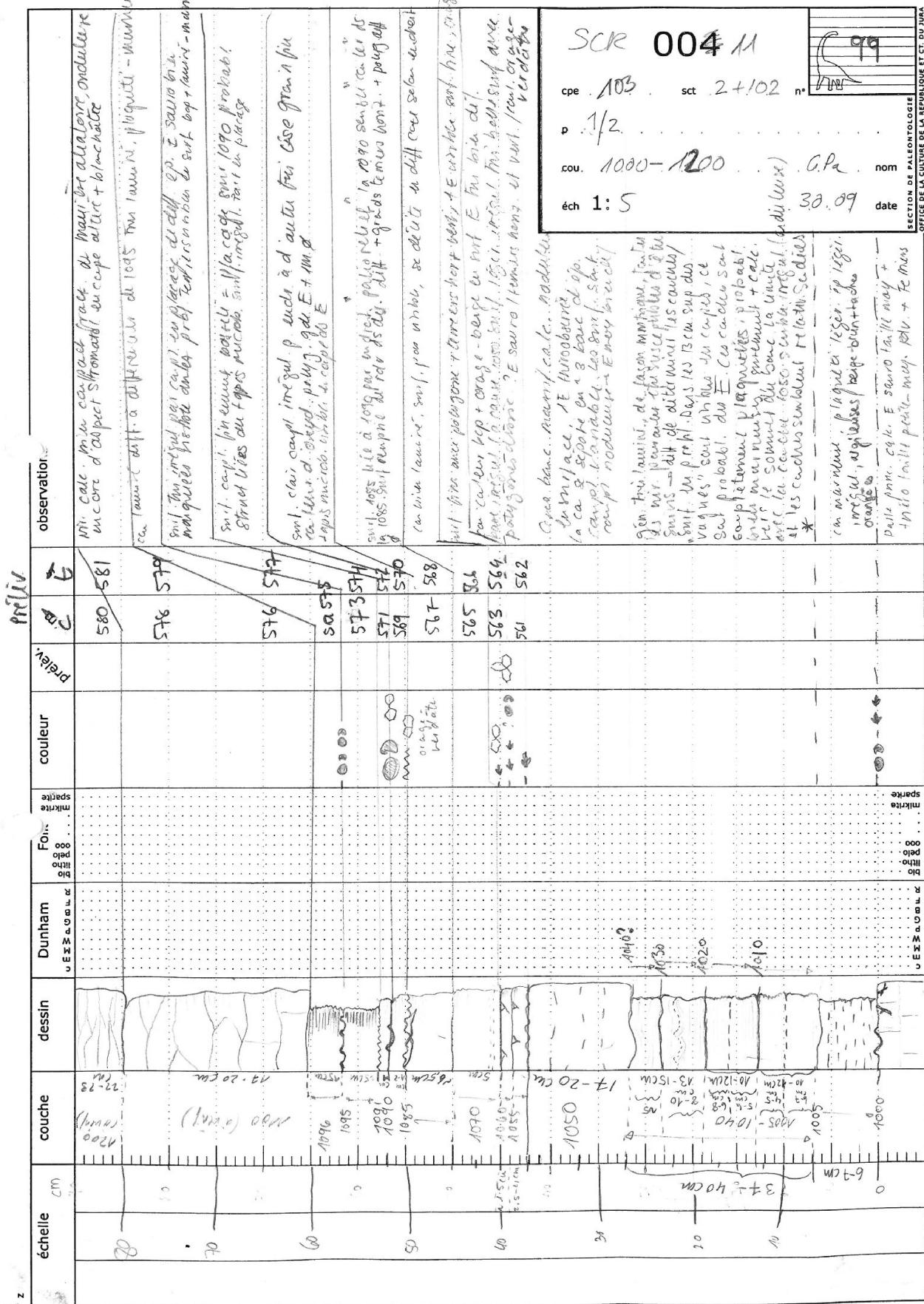


Fig. 45. Exemple de lever de coupe réalisé sur un document standardisé.

Observations sédimentologiques par couche

Site	B54	Uni	20	Cou	1060
Dernière saisie par		Nom/Date	MJ, SG / 29.06.07		

Description détaillée de la surface de la couche

Surface beige clair avec altération + forcée, surface ± bosselée rugueuse, à grains grossiers, présence de ferrier, présence de ridges de végétation. Mauvement visible. Trace de Theropodes d'~ 20 cm. Surface à failles que l'on voit sur les couches par endroit. Pas mal de petits dégâts sur la couche. Polygones de dessication.

Préservation empreintes	Bourrelet	ET, bourrelet pas vraiment bien visible	Profondeur	0,5 à 1 cm
Détails anatomiques	NON		Remplissage	quelques placages
Fractures tectoniques	Nbre systèmes	2	Orientation syst. 1	E-W
Fentes de dessiccation	Diamètre	Entre 6/7 cm pr 12/17 cm	Nbre systèmes	
Rides de vagues	Amplitude	~4 cm.	Profondeur	1-2 mm
			Orientation	SE-NW

Description détaillée de la couche

Couche de 12-13 cm d'épaisseur, couche beaucoup + marnieuse que la 1070 ou 1080. Grains grossier, présence de quelques grains noirs.

Microfaciès		Épaisseur	12-13 cm	Variation latérale	~ 2-3 cm.
-------------	--	-----------	----------	--------------------	-----------

Emplacement de la couche dans la coupe

Coupe	N° couche	Épaisseur	Microfaciès	Description
	1075	5-6		
	1070	5-6		
	1065	4-5		
	1060	12-13		couche + marnieuse que celle du dessus
	1055	5-6		
	1050	14-15		

Prélèvements

Lame mince (t)	Argile (c)	Isotope (si)	Lavage (w)
----------------	------------	--------------	------------

Sévement le où il y a des failles

Fig. 46. Exemple d'une description sédimentologique réalisée sur un site à traces de dinosaures.

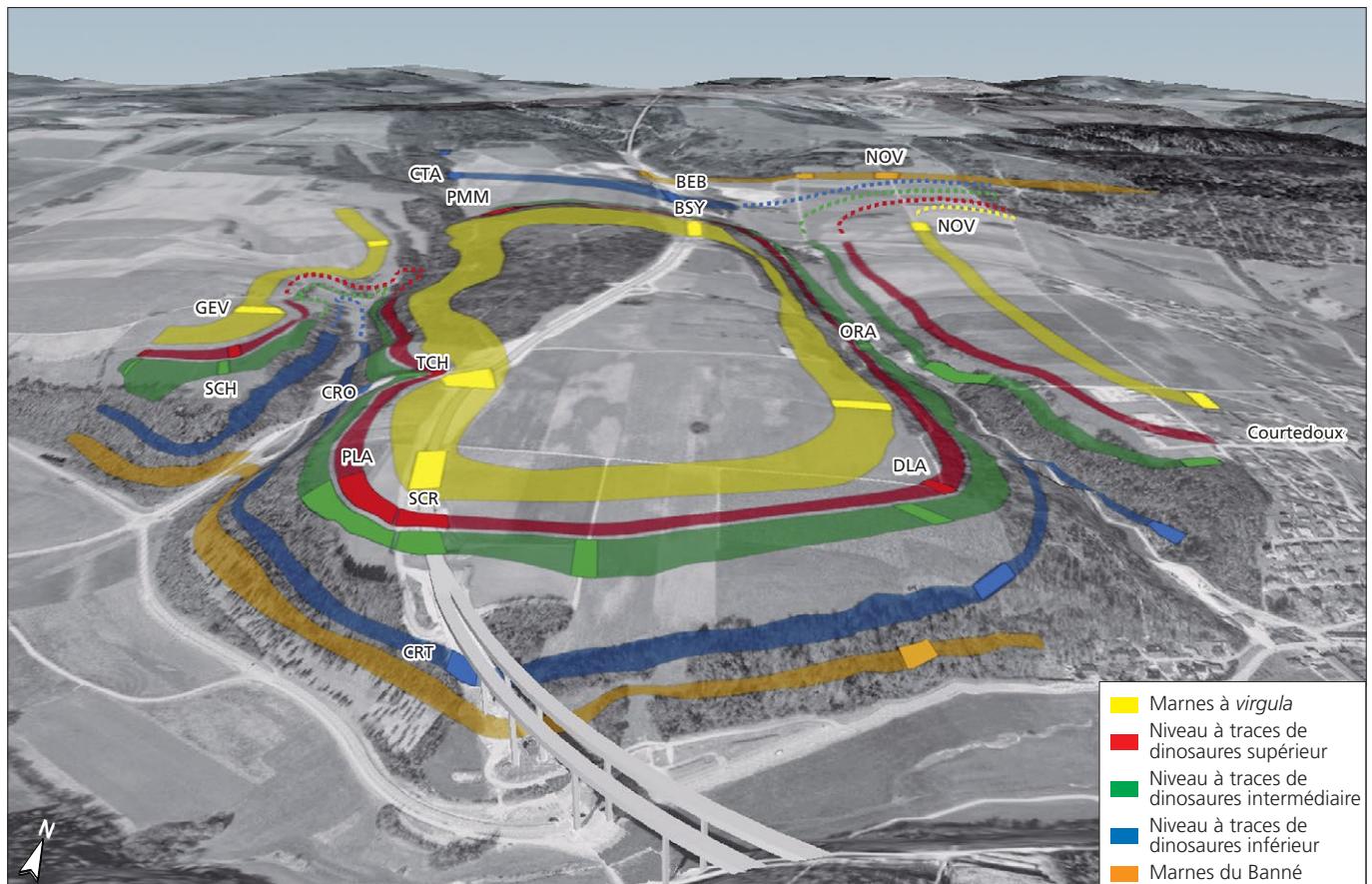


Fig. 47. Carte du plateau de Courtedoux avec les corrélations des niveaux à empreintes découverts sur et hors du tracé A16 (modifié d'après Comment et Paratte 2013). Les zones en surbrillance correspondent aux zones fouillées.

CHE-CRO	Chevinez-Combe Ronde	CTD-BSY	Courtedoux-Bois de Sylleux	CTD-PLA	Courtedoux-Plage
CHE-CRT	Chevinez-Crat	CTD-CTA	Courtedoux-Champs Tannays	CTD-PMM	Courtedoux-Pommerat
CHE-GEV	Chevinez-Genevroyes	CTD-DLA	Courtedoux-Dessus Latchire	CTD-SCR	Courtedoux-Sur Combe Ronde
CHE-SCH	Chevinez-Sur Côte de l'Honne	CTD-NOV	Courtedoux-Nova	CTD-TCH	Courtedoux-Tchafouè
CTD-BEB	Courtedoux-Béchat Bovais	CTD-ORA	Courtedoux-Oratoire		

4.2 Numérisation des coupes

Toutes les coupes relevées dans les niveaux à traces ont été numérisées de manière homogène sur le programme informatique Adobe Illustrator; pour plus de détails sur ces techniques et ces documents, voir le catalogue *Stratigraphie du Jurassique supérieur*.

4.3 Étude des microfaciès

Les microfaciès provenant des échantillons liés aux coupes levées pour l'étude traces de dinosaures ont pour la plupart été étudiés et décrits. D'une part dans Marty et al. 2003 et notamment la thèse de D. Marty (2008), d'autre part dans des études intermédiaires (Gretz 2010; Sandoz 2010). Pour plus de détails, voir le catalogue *Stratigraphie du Jurassique supérieur*.

4.4 Analyses spécifiques

(argiles, isotopes, palynologie, etc.)

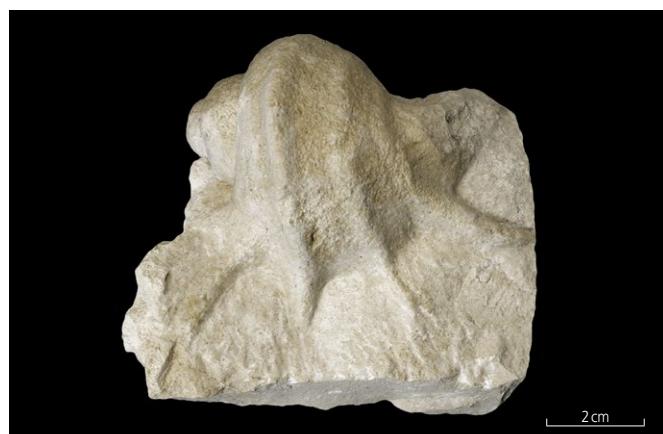
Des analyses ciblées ont été réalisées selon les besoins et les strates. L'étude des argiles couvre tous les niveaux à empreintes de dinosaures prélevés. Une partie de ces analyses ont été réalisées par J.-F. Deconinck et décrites dans Marty 2008; la plupart, envoyées à Lausanne chez T. Adatte, sont traitées dans le catalogue *Stratigraphie du Jurassique supérieur*.

5 Fossiles

5.1 Macrofossiles

Les macrofossiles spécifiquement liés aux niveaux à traces (surtout nérinées, huîtres, os de crocodiliens et de tortues, dents de poissons, etc.) ne figurent pas dans cette étude. Une partie d'entre eux ont déjà été préparés et mis en collection; d'autres sont conservés de manière brute dans la collection de la PAL (voir les catalogues *Traces de dinosaures jurassiques*, chap. 3 et les catalogues *Vertébrés mésozoïques*).

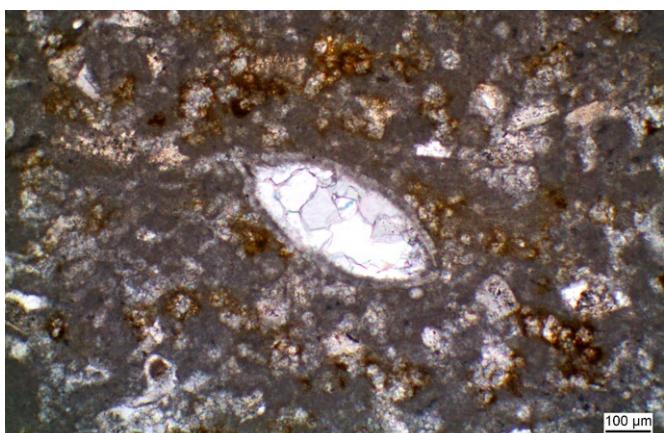
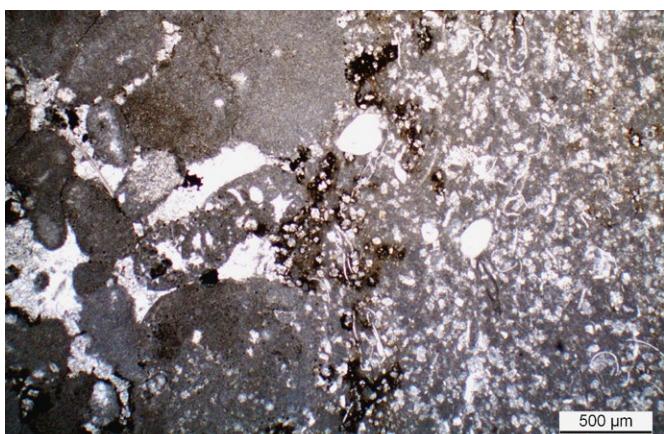
Ci-dessous, trois exemples de macrofossiles trouvés dans les niveaux proches des intervalles à traces (*Lithacoceras*, TCH007-93; *Harpagodes oceanii*, SCR002-1053; *Nerinea*, SCR002-365).



5.2 Microfossiles

Les microfossiles spécifiquement liés aux niveaux à traces ne figurent dans cette étude. Toutes les marnes prélevées dans les niveaux à empreintes ont cependant été lavées et piquées par l'équipe technique du Voirnet au sein du laboratoire de lavage/tamisage et picking. Les résultats des échantillons analysés figurent dans le catalogue *Stratigraphie du Jurassique supérieur*. Les microfossiles observés dans les lames minces sont décrits (Marty 2008; Sandoz 2010; Gretz 2010).

Ci-dessous, trois exemples de lames minces issus des niveaux proches des intervalles à traces (couche 410; 510-515; 1065).



6 Documentation des empreintes

6.1 Documentation scientifique

6.1.1 Analyse des surfaces et identification ichnologique

Ce texte s'inspire de la thèse de doctorat de D. Marty (2008) et de Falkingham et al. (2016).

Introduction

Les dinosaures constituent l'un des groupes de vertébrés terrestres présentant les morphologies les plus diversifiées (Alexander 1989); ils sont répartis en une grande panoplie de tailles. Ils ont développé toute une gamme de postures allant de bipède à quadrupède, ou parfois semi-quadrupède pour certains. Leurs squelettes de même que leurs empreintes ont été retrouvés sur chacun des continents, excepté en Antarctique (Weishampel et al. 2004).

Les traces de dinosaures sont des structures biogéniques et sédimentaires, et non des organismes fossiles à proprement parler. La représentation des dinosaures ne provient presque que de leurs squelettes. Les informations qui en découlent restent limitées, puisque qu'elles nous renseignent sur ce dont elles proviennent, un animal mort. Les empreintes sont en réalité dérivées des mouvements d'un animal durant sa vie.



Ainsi, des aspects paléobiologiques tels que le comportement, la locomotion ou la paléoécologie, impossibles à lire dans des ossements, peuvent en être déduits.

La découverte d'empreintes en Ajoie indique la présence de dinosaures qui se sont déplacés en bordure de plage, tout en imprimant leurs pas dans une boue calcaire (fig. 48b). Grâce à la chaleur, ces marques ont séché et durci, permettant par là même leur préservation (fig. 49); elles ont ensuite été recouvertes de sédiments. Ainsi protégées, elles se sont conservées et ont subsisté dans nos sols jusqu'à aujourd'hui. Plusieurs figures sédimentaires témoignent du milieu dans lequel ces traces ont été laissées. La présence de laminations, de rides de courant (fig. 48c) – le terme « rides de courant » est utilisé comme terme générique pour désigner les rides de courant et/ou les rides de vagues car la distinction formelle entre les deux n'a pas été faite systématiquement –, de polygones de dessiccation (fig. 48d), des perforations d'invertébrés, figures observées dans les zones de marée actuelles (type Bahamas, fig. 48a), indiquent un faciès de plage presque ou totalement émergée.

La formation et la préservation d'une empreinte résultent de l'interaction complexe entre le mode de déplacement d'un animal, l'anatomie de ses « pieds » et de ses « mains », mais aussi des



Fig. 48. a) paysage actuel, Wood Key, Eleuthera Island, Bahamas; b) reconstitution d'une plaine côtière il y a 152 millions d'années; c) rides de courant fossilisées; d) polygones de dessiccation fossilisés retrouvés sur un niveau à traces de dinosaures.

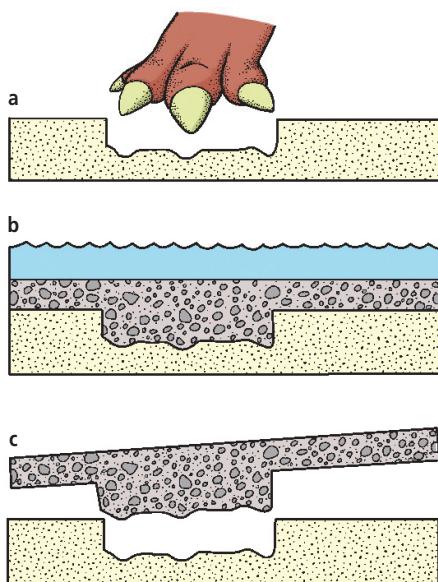


Fig. 49. Formation des empreintes de dinosaures (Paratte 2012; modifié d'après Mossman et Sarjeant 1997). a) création de l'empreinte; b) l'empreinte sèche, durcit, puis est recouverte de sédiments lors de la marée suivante; c) la couche supérieure décapée laisse apparaître l'empreinte formée des millions d'années plus tôt.

propriétés du substrat et des processus taphonomiques. Une trace est une structure complexe en trois dimensions, présente à la fois à l'interface entre le sédiment et le pied mais aussi dessous, à l'intérieur de ce sédiment. L'ichnologie s'est bien développée en tenant compte de cet aspect complexe, devenant très interdisciplinaire en intégrant les domaines liés comme la sédimentologie, la mécanique des sols, la biomécanique en plus de la taxinomie et de la paléontologie traditionnelle.

L'aspect d'une empreinte dépend de certains paramètres liés au milieu dans lequel elle se forme. L'humidité, la chaleur et les algues qui prolifèrent dans des environnements de plages en conditionnent sa morphologie et peuvent conduire à certaines modifications, altérations et déformations de la trace. Il est en effet aisément de s'imaginer qu'une empreinte sera différente selon qu'elle est imprimée dans un sédiment gorgé d'eau ou sec.

La couche sur laquelle le dinosaure marche sera parfois enfouie sous la nouvelle couche déposée avant qu'elle n'ait totalement séché. Lorsqu'un dinosaure imprime ses pas sur cette surface fraîche, un

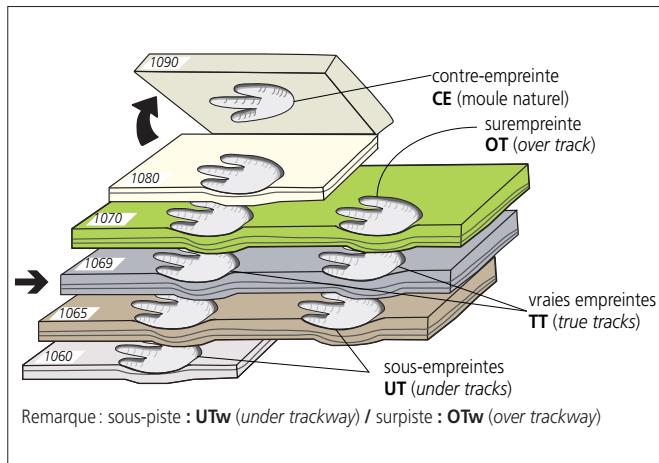


Fig. 50. Cas théorique d'une superposition de couches présentant des surempreintes et des sous-empreintes de dinosaures (biolaminites). La flèche indique la couche sur laquelle les empreintes ont été laissées.

ou plusieurs niveaux sous-jacents peuvent être déformés par le poids de son passage si'ils ne sont pas complètement solidifiés. Cela rend l'interprétation d'une empreinte difficile car, en l'absence de marqueurs particuliers (griffes, phalanges, etc.), il sera pratiquement impossible de définir si le dinosaure a réellement foulé ladite couche étudiée (fig. 50).

Au décapage, une même trace peut donc être observée sur plusieurs couches successives. Une facette exceptionnelle et fondamentale du travail réalisé par la Paléontologie A16 sur les empreintes de dinosaures réside dans le fait d'avoir pu fouiller et documenter, couche par couche, les intervalles à traces (fig. 51). Les niveaux à empreintes sont généralement retrouvés plutôt sur des surfaces uniques, affleurant naturellement, et mis au jour par altération. Les moyens financiers sont rarement à disposition pour des fouilles manuelles de grande envergure et pour une documentation systématique. Cette méthodologie est pourtant primordiale pour comprendre, d'un niveau à l'autre, l'interaction des traces ou pour distinguer les «vraies» empreintes des surempreintes ou des sous-empreintes.

L'analyse est une phase complexe et sujette à des erreurs fréquentes si elle n'est pas réalisée de manière consciente. En ce sens, les démarches de terrain sont les plus complètes et les plus systématiques possible afin de pouvoir mener une étude interdisciplinaire associant des données sédimentologiques, ichnologiques, paléontologiques et paléoécologiques.

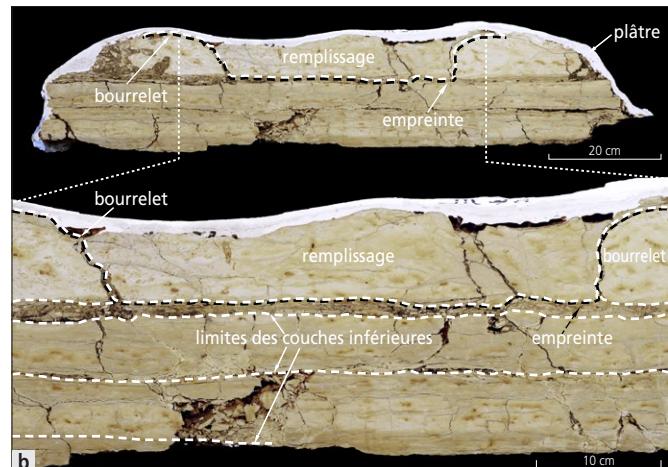
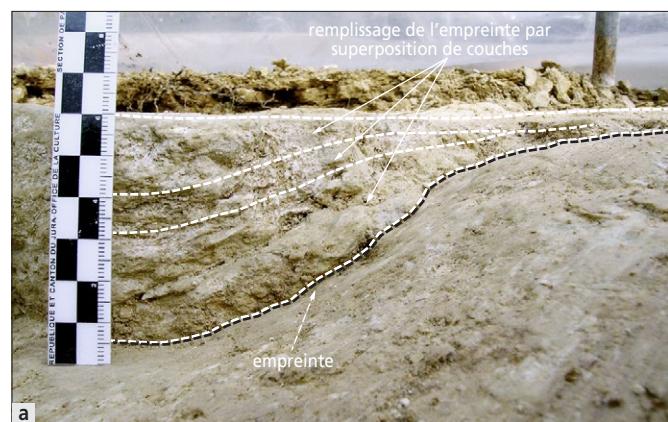


Fig. 51. a) coupe d'une empreinte en position sur le terrain avec le sédiment déposé bien visible à l'intérieur; b) coupe réalisée à l'aide d'une scie à travers une empreinte et les couches sous-jacentes (modifiés d'après Marty 2008).

6.1.1.1 Généralités

Ichnologie et dinosaures

L'ichnologie des dinosaures est un domaine existant depuis 150 ans, les empreintes de dinosaures ayant été documentées avant le matériel ostéologique. Les premières empreintes de vertébrés fossiles sont découvertes en 1820 dans le Permien écossais; elles furent interprétées à tort comme des traces de tortues par William Buckland (Pemberton 2010). Les fameuses empreintes triassiques de *Chirotherium*, du grec « main animale » en raison de leur ressemblance avec des mains humaines, sont trouvées peu après. Les premières empreintes de dinosaures ont été décrites par Hitchcock en 1836, six ans avant que Owen, paléontologue anglais, par ses travaux d'anatomie comparée, ne nomme formellement les dinosaures. Ce n'est que bien plus tard qu'une empreinte tridactyle large est mise au jour dans le Crétacé inférieur du sud de l'Angleterre, attribuée à *Iguanodon* en 1862 (Jones 1862). C'est Hitchcock qui apporta la plus grande contribution à ces recherches durant cette période, concrétisée par une série de publications (Hitchcock 1848, 1858, 1866).

À la mort d'Hitchcock en 1863, alors que les connaissances en ichnologie augmentent beaucoup, cette branche est négligée et subit un temps mort (Lockley & Gillette 1989). En 1962, Lapparent répertorie seulement 27 ou 28 sites à traces dans le monde (Lapparent 1962). C'est finalement au début des années 1980 qu'a lieu une « renaissance des traces de dinosaures » (Lockley 1986, 1991a, 1991b; Lockley & Gillette 1987). Dès lors, des centaines de sites à traces ont été découverts à travers le monde. L'étude des traces, incluant la description de nouvelles morphologies, se dirige vers une compréhension globale de la paléobiologie, de la paléoécologie (Lockley 1986, 1987), de la biostratigraphie et de la locomotion (Alexander 1977, 1989; Padian & Olsen 1989). C'est à cette époque que de nouvelles méthodes se mettent en place pour distinguer les pistes (Moratalla et al. 1988), et les premières tentatives de documentation en trois dimensions voient le jour (Ishigaki & Fujisaki 1989). L'engouement continue dans les années 1990 par la parution de plusieurs livres d'intérêt (Lockley 1991a), qui font aujourd'hui encore partie du noyau de la littérature ichnologique (Leonardi 1987; Lockley 1991c; Lockley & Gillette 1989; Lockley & Hunt 1995; Thulborn 1990).

Documentation des empreintes

Les informations sur la morphologie superficielle d'une empreinte constituent la base de l'analyse ichnologique et doivent être recueillies de la manière la plus objective possible, particulièrement lorsque les spécimens étudiés ne peuvent être extraits et restent sur le terrain où ils sont soumis à l'érosion ou à la destruction (p. ex. Sarjeant 1989; Gatesy et al. 2005a; Garcia-Ortiz et al. 2014). Il est généralement difficile de produire une illustration objective des empreintes puisqu'elles présentent, pour la plupart, des bords arrondis et non des bordures nettes, franches ou exactes (Thulborn 1990). Le contour de l'empreinte dessinée est souvent simplifié, sujet à l'interprétation du dessinateur puisque réalisé à partir d'un objet en trois dimensions complexe à représenter (p. ex. Thulborn 1990; Gatesy et al. 2005a).

Des méthodes de plus en plus sophistiquées sont donc appliquées afin de représenter de la manière la plus impartiale possible la morphologie en trois dimensions ou le contour de l'empreinte. Pour des sites considérés comme géosites, géotopes ou d'importance patrimoniale (p. ex. Lockley & Meyer 1997; Marty et al. 2004), une documentation exhaustive, grâce aux nouvelles technologies, peut être appliquée pour des sites entiers. Ce genre d'investissement reste pourtant coûteux et nécessite une logistique importante.

Le balayage laser (Bates et al. 2008a; Breithaupt et al. 2001, 2004, 2006; Breithaupt & Matthews 2001; Hurum et al. 2006; Matthews et al. 2005, 2006; Meyer & Thüring 2006; Thüring et al. 2007), la photogrammétrie (Breithaupt & Matthews 2001; Matthews & Breithaupt 2001; Matthews et al. 2006) ou bien encore la photogrammétrie aérienne de basse altitude (Matthews et al. 2002) sont autant de méthodes qui peuvent être utilisées de manière individuelle ou combinée (Breithaupt et al. 2004, p. ex.). L'apparition récente d'applications de photogrammétrie « open source » et gratuites, ne nécessitant plus des spécialistes et des ordinateurs ultraperformants, ouvre considérablement les possibilités d'utilisation de ce type de support pour des coûts beaucoup plus raisonnables (Falkingham 2012). L'évolution des technologies permet à l'heure actuelle non seulement d'obtenir des images en trois dimensions mais également de les partager très facilement avec le monde scientifique.

Plusieurs études se sont concentrées sur la compréhension des mécanismes de formation des empreintes par le biais de processus expérimentaux (Manning 2004; Jackson et al. 2009, 2010; Milàn & Bromley 2006, 2008; Marty et al. 2009). Ces études ont permis de mettre en évidence l'importance des sous-empreintes, phénomène déjà décrit et expérimenté par Allen (1989, 1997). Des simulations techniques permettent également d'étudier les processus de formation des empreintes (Falkingham & Gatesy 2014) et des approches par modélisation 3D (Henderson 2003, 2006a-b; Sellers et al. 2009).

Études quantitatives

Les chercheurs ont commencé à utiliser les données numériques pour décrire et caractériser la morphologie des empreintes. Moratalla en est un précurseur, pratiquant l'analyse multivariée pour discerner les théropodes des ornithopodes (Moratalla et al. 1988; Romilio & Salisbury 2011; Thulborn 2013). D'autres études quantitatives se sont intéressées aux données en trois dimensions pour en tirer des comparaisons objectives entre les empreintes (Bates et al. 2008b; Castanera et al. 2013; Razzolini et al. 2014).

Analyses statistiques des pistes de dinosaures de l'A16

Un projet novateur entre la Paléontologie A16 et les scientifiques Kent A. Stevens et Scott Ernst vise à développer un logiciel, outil de recherche indispensable afin d'assurer une analyse de grande rigueur des données ichnologiques jurassiennes. Cette méthodologie d'analyse des pistes relève de la statistique et intègre des estimations d'incertitude attribuées à chaque valeur des données primaires (position, dimension et orientation de chaque

empreinte). Bien que des pratiques similaires soient utilisées dans certaines sciences comme la physique ou l'astrophysique, elles n'ont jamais été appliquées à l'ichnologie.

Classiquement, l'interprétation de pistes implique d'en distinguer les différents profils (écartement large ou étroit, p. ex.) et d'en déduire des formules empiriques (lien entre la vitesse et la hauteur à la hanche, p. ex.). Il en découle cependant une quantité infinie d'interprétations, le nombre d'inconnues dépassant amplement le nombre d'éléments connus ou de suppositions prudentes nécessaires pour l'identification concrète d'un animal.

Ce projet propose une nouvelle méthode de restriction incrémentielle du nombre d'interprétations possibles, contrairement à la pratique plus courante qui consiste à utiliser «à l'aveuglette» des formules empiriques non vérifiées. Actuellement en développement, le logiciel baptisé *Cadence toolset* facilitera l'analyse et l'interprétation des pistes de dinosaures.

Les premiers résultats scientifiques ont conduit à la réalisation d'un chapitre – *Uncertainty and Ambiguity in the Interpretation of Sauropod Trackways* (Incertitude et ambiguïté dans l'interprétation des pistes de sauropodes) – qui figure dans un ouvrage intitulé *Dinosaur Tracks-Next Steps* (Falkingham et al. 2016). Ce chapitre donne une vue d'ensemble des principales sources d'ambiguïté liées à l'interprétation des pistes, mettant en exergue les difficultés inhérentes à la déduction du type de dinosaure, de sa taille et de la démarche de l'animal, qui s'avèrent beaucoup plus conséquentes que prévu. Il n'est donc pas envisageable de se contenter d'ajuster les paramètres d'un modèle numérique d'animal reproduisant fidèlement un ensemble donné d'empreintes de dinosaure (solveur actif). L'objectif suivant est donc de créer un solveur passif permettant d'examiner uniquement ce qui est nécessaire de savoir et d'éliminer les alternatives impossibles, ce qui revient à «sculpter» l'espace des solutions en excluant les solutions interdites (inutiles), ce qui permet de réduire cet espace et de formuler des hypothèses.

L'analyse multivariée vise à révéler des schémas de contraintes intrinsèques. Elle a pour but de répondre en termes quantitatifs à de nombreuses interrogations soulevées par les pistes découvertes par le projet A16 :

- comment la longueur de l'enjambée évolue-t-elle par rapport à la largeur (et longueur) de l'empreinte ? Comment varie-t-elle le long d'une piste ?
- comment la rotation de la main (et du pied) oscille-t-elle par rapport aux autres éléments observables, par exemple la longueur de l'enjambée et le rythme de la piste ?
- comment le rythme de la piste varie-t-il selon d'autres éléments observables ?

Il est primordial de répondre à ces questions avant toute autre interprétation.

Méthodes et études dérivées

Les quatre domaines décrits ci-dessous étaient au cœur de l'étude au début du mandat et paraîtront sous forme de publications scientifiques.

Le premier, lié à la méthodologie, traitera d'une vue d'ensemble de l'architecture informatique et de la distinction entre les approches actives (simulation de l'animal ayant laissé ses empreintes) et passives (contrainte progressive). L'étude montre pour l'heure que ce qui est vraiment important c'est d'attribuer des incertitudes aux données.

Le deuxième aura pour mission de se rapprocher d'une identification des auteurs des empreintes par le biais d'une analyse statistique permettant de suggérer des populations de sauropodes distinctes, d'amener la preuve de la variation ontogénétique dans la démarche des sauropodes et l'identification multivariée des individus ayant laissé leurs empreintes. L'application de contraintes multiples (cinématiques, taxonomiques et dynamiques) et un modèle statistique des pistes permettent en effet d'affiner pas à pas, par exclusion, des animaux pour des pistes spécifiques.

Cette approche n'a pas fourni pour le moment de résultats percutants pour l'étude menée sur les données de l'A16 uniquement. Statistiquement parlant, il n'y a pas de populations spécifiques qui se sont distinguées, ce qui signifie qu'il n'y a pas pour le moment d'évidence pour plusieurs types de sauropodes. Par contre, l'analyse basée sur la morphologie des empreintes montre qu'il est fort probable que la plupart des pistes (de petite et moyenne taille) aient été laissées par une seule espèce de sauropode (p.ex les bébés et juvéniles sur BSY 1040). Cependant concernant les empreintes de grande taille, les lacunes de détails anatomiques ne permettent pas d'arriver à la même conclusion, des empreintes mieux définies seraient nécessaires.

Pour compléter cette étude, des données de comparaison d'autres sites et périodes géologiques (p.ex. des pistes laissées par des titanosaures en Crétacé supérieur de la Bolivie) sont actuellement utilisées pour affiner les résultats.

Le troisième abordera la locomotion et la biomécanique selon différentes approches. Une mesure de la distance gléno-acétabulaire plus affinée de l'animal ayant laissé ses empreintes sera recalculée. L'estimation classique de la taille de l'animal basée sur la distance gléno-acétabulaire mesurée auparavant est beaucoup moins précise. Les mesures des distances entre les empreintes sont réexaminées en prenant en considération le lien entre les facteurs liés à la démarche, telle que la longueur d'enjambée maximale de l'animal en fonction de sa taille et des dimensions des empreintes. Une meilleure estimation de la taille des animaux en découlera.

Ce chapitre inclura également une analyse spécifique des pistes de quadrupèdes comportant des empreintes de pieds uniquement. Il arrive très fréquemment que les pistes de sauropodes témoignent d'un chevauchement total des empreintes de mains par celles de pieds, il faut en déduire une relation cohérente entre le pas et la longueur d'enjambée.

La variation de la démarche des sauropodes en fonction de leur vitesse sera également étudiée. Les possibilités significatives de

faire varier la vitesse comprennent l'augmentation de la longueur de l'enjambée, la hausse du nombre de pas ou la combinaison de ces facteurs. Les conséquences biomécaniques de ces alternatives sont étudiées selon l'enregistrement de pistes provenant des sites de l'autoroute A16.

Finalement, les méthodes utilisées par les sauropodes pour tourner seront examinées par le biais de l'observation des variations statistiques et des changements de direction qui fournissent des indications sur les stratégies des sauropodes en la matière.

Le dernier domaine de recherche traitera du comportement social et des interactions entre les animaux ayant laissé leurs empreintes. Une analyse de deux pistes de sauropodes permettra d'indiquer si les animaux qui les ont laissés se sont déplacés ensemble ou si ils se suivaient. La corrélation entre les deux pistes parallèles et proches, S18 et S19 (BEB niveau 515), laisse entendre que deux sauropodes interagissaient, l'un suivant l'autre de près. Leur étude suggère qu'ils étaient conscients l'un de l'autre, réagissant apparemment par des changements de vitesse et de direction selon les changements de direction de l'autre piste. L'irrégularité des empreintes sera examinée sur les pistes de sauropodes suggérant avec évidence une hésitation pour la position debout, le but étant de définir s'il s'agit d'erreurs ou d'intentions. Alors que la plupart des pistes montrent clairement une progression vers l'avant, certaines pistes comportent des empreintes supplémentaires ou des empreintes irrégulières ou atypiques. Tous ces types d'empreintes (ainsi que les schémas de pistes inhabituels présentant une irrégularité semblable et suggérant des placements de pieds à des moments différents) sont très difficiles voire impossibles à interpréter selon une approche classique. Cependant, les analyses statistiques permettent de détecter ce type d'occurrences grâce à un modèle d'animal ayant laissé ses empreintes (Stevens & Ernst 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017).

Perspectives de l'ichnologie

Les empreintes fossiles de vertébrés sont une grande source de données permettant de compléter celles des enregistrements fossiles. Les données ostéologiques et ichnologiques sont toutes deux incomplètes; provenant de milieux différents, elles en deviennent complémentaires (Carrano & Wilson 2001; Falkingham et al. 2012). Les empreintes ne transmettent pas uniquement des informations sur des paléoenvironnements mais peuvent aussi révéler des aspects de la paléobiologie, difficiles à déduire des ossements. Elles correspondent à des enregistrements directs de la locomotion et, par déduction, du comportement. Pour permettre de représenter un dinosaure au plus près d'une créature vivante (Farlow et al. 2012), les traces sont souvent les seules sources utilisables pour des tests biomécaniques, dérivés du squelette.

L'aspect paléoécologique des empreintes de dinosaures est finalement aussi important que l'aspect paléobiologique. Le lien indissociable entre la trace et le sédiment induit que les interprétations basées sur la sédimentation informe automatiquement sur le milieu dans lequel l'animal vivait. Ce cas est opposé à celui des

squelettes fossiles qui renseignent, eux, uniquement sur l'endroit où les restes de l'individu ont été fossilisés, ce dernier pouvant se situer à de grandes distances de son milieu de vie ou même avoir été remanié à partir d'anciens dépôts (Behrensmeyer 1982).

Le grand avantage de l'étude des empreintes provient de leur fréquence. Un animal laisse derrière lui un seul squelette mais potentiellement des milliers d'empreintes (Lockley 1998). Les grands vertébrés terrestres n'ont pas pour habitude de coloniser des endroits donnés, ils vivent en densité de population peu élevée, se répartissent sur de grandes étendues. Une accumulation d'ossements au même endroit n'est donc générée que dans des conditions particulières. Les processus qui engendrent ce type de concentration, en une localité donnée, constituent un biais pour la représentation des espèces, des individus et des parties du corps par rapport aux populations originelles (Behrensmeyer 1991).

6.1.1.2 Analyse

L'interprétation d'une empreinte est un travail singulier et complexe. Il est indispensable de comprendre les données en tenant compte des sources d'erreur, des incertitudes et des biais potentiels.

Identification de l'auteur

La première question qui se pose immanquablement lorsque l'on découvre un site à traces est: « qui a laissé ces traces ? » Hitchcock argumentait: « si l'on peut identifier un animal avec un seul os, pourquoi ne serait-il pas possible de reconstituer un animal à partir de son empreinte. Après tout, une empreinte enregistre plus de l'anatomie qu'un seul os ! »

Malheureusement le lien n'est pas aussi direct, la morphologie de l'empreinte ne reflétant qu'en partie l'anatomie « réelle » du pied. Les propriétés du substrat et l'étude des mouvements du pied (cinématique) contribuent également à la préservation, mais ces facteurs sont rarement abordés et souvent mal compris. Compte tenu de la difficulté, c'est la morphologie de l'empreinte qui est retenue plutôt qu'un genre ou une espèce. Les empreintes ont par conséquent une définition taxinomique basse (beaucoup de théropodes différents laissent un type d'empreintes a priori similaire), et sont rarement attribuées plus précisément qu'au niveau de la famille. Seuls les taxons avec des morphologies très distinctives constituent des exceptions.

Ichnotaxinomie

L'attribution d'une empreinte de dinosaure à un nouvel ichnotaxon est un concept très présent dans la littérature liée aux empreintes. Pour certains, il est devenu impératif de donner un nom binomial aux traces découvertes et les termes « ichnogenre » et « ichnoespèce » sont apparus. Cependant, comme pour les ossements, ces noms sont uniquement basés sur la morphologie et la distinction genre/espèce est pratiquée subjectivement selon les similarités ou les disparités morphologiques. L'ichnotaxinomie permet d'attribuer des formes complexes sans devoir réaliser des paragraphes entiers de textes descriptifs, idée déjà présente chez Hitchcock (1858).

L'ichnotaxinomie s'apparente à une sorte de mot clé permettant de désigner des morphologies complexes en trois dimensions; elle n'a pas enlevé la tentation d'associer une empreinte à un individu supposé qui reste omniprésente.

Cette discipline rencontre plusieurs problématiques, du même ordre que pour la taxinomie des organismes. Tout d'abord, la définition des différences morphologiques et l'évaluation des degrés de différenciation nécessaires pour établir d'un nouvel ichnogenre, sont des paramètres difficiles à dresser. Ensuite, la distinction entre les taxons devient floue puisque de plus en plus d'ichnogenres ou d'ichnoespèces « intermédiaires » sont découverts. Pourtant, l'enregistrement des empreintes est bien plus continu que l'enregistrement d'ossements. Par contre, le profil des empreintes peut varier au sein d'une même piste selon des changements de consistance et d'épaisseur du substrat, selon la manière dont l'animal se déplace, ou par le biais de l'altération/érosion agissant avant ou après la lithification. Ainsi, alors que les fossiles ne présentent qu'un sous-ensemble relativement discret du cycle de la vie, les pistes peuvent présenter une gamme presque infinie de morphologies, brouillant de la sorte les pistes de l'interprétation. En 2012, Farlow demande: « Qu'est-ce qu'un ichnotaxon ? Quel est le but et l'avantage d'attribuer des noms aux empreintes fossiles de vertébrés ? » (Farlow et al. 2012). Si les ichnotaxons servaient uniquement à distinguer les morphologies, il ne serait pas problématique d'assigner plusieurs ichnotaxons à une seule piste présentant des variations morphologiques pour une quelconque raison.

Formation d'une empreinte

La plupart des mécompréhension des traces sont probablement dues au fait qu'un seul impact de pied peut engendrer des empreintes non seulement sur le niveau touché, le niveau superficiel (vraie empreinte), mais également sur plusieurs niveaux inférieurs et sous diverses formes (sous-empreintes). Les processus de formation d'une empreinte peuvent aussi induire une variété de structures dérivées (extramorphologiques), telles que les bourrelets. Par la suite, les processus taphonomiques sont susceptibles d'altérer la trace, conduisant à des « modified true track » et/ou « internal overtrack » (Marty et al. 2009).

L'importance de cette distinction entre vraies empreintes et sous-empreintes est déjà reconnue par Hitchcock en 1858. Aujourd'hui, il est admis que pour toute étude ichnotaxinomique et paléoécologique sensée, il est impératif de faire cette différence et de se référer uniquement aux « vraies empreintes ». Seuls des détails anatomiques fins, tels que des marques de doigts, de griffes ou de peau, permettent de les identifier avec un bon degré de certitude. Ce genre de détails est cependant rarement préservé. Soit les pieds des animaux ne sont pas propices à laisser de telles traces, soit les propriétés du substrat ne favorisent pas une préservation optimale, soit les empreintes sont formées au cours des processus taphonomiques (Cohen et al. 1991 ; Henderson 2006b ; Milàn & Bromley 2006 ; Nadon 2001 ; Padian & Olsen 1984 ; Scott et al. 2007). Des empreintes exposées à l'air libre se dégradent rapidement après leur formation et ont un bas potentiel de préservation. Certains paramètres

comme la cimentation précoce (sédiment ou tapis microbien), un recouvrement rapide par du sédiment ou la prolifération d'un tapis microbien, sont favorables à leur conservation (Phillips et al. 2007 ; Marty et al. 2009 ; Carmona et al. 2012 ; Carvalho et al. 2013). Le temps écoulé entre la formation de l'empreinte et son enfouissement peut potentiellement affecter sa préservation (Laporte & Behrensmeyer 1980), de même que la durée moyenne de l'ichnoassemblage, rendant l'empreinte difficile à interpréter avec certitude.

Notion d'empreinte idéale

Des études d'empreintes d'hominidés, laissées sur des tapis microbiens dans des environnements de plaines tidales actuelles, révèlent de grandes variations morphologiques (fig. 52). Même sur des substrats « idéaux » (humides non saturés en eau, tapis microbiens plastiques), il s'est avéré difficile d'enregistrer volontairement une empreinte « parfaite » avec ses détails anatomiques, l'impression des doigts par exemple, ce qui permettrait inévitablement de l'identifier comme « vraie » empreinte. Il est encore plus improbable de produire une empreinte « parfaite » si l'individu concerné change de comportement (course, marche, etc.) puisque cela induira des traces de morphologies différentes au sein d'une même piste (p. ex. Thulborn & Wade 1989 ; Milàn 2006). De plus, la morphologie de l'empreinte est étroitement liée aux propriétés (consistance) et à l'épaisseur du substrat sur lequel l'individu se déplace (p. ex. Farlow 1992 ; Marty et al. 2006b ; Uchman & Pervesler 2006). L'enregistrement d'une empreinte de « mauvaise qualité » peut donc être due uniquement à des propriétés défavorables du substrat (p. ex. Brand 1996 ; Diedrich 2002b). L'identification d'une « vraie empreinte » est complexe puisque l'empreinte, lors de l'enregistrement fossile, subit plusieurs étapes taphonomiques et diagénétiques. Ces propos renforcent ceux d'Allen (1997) pour qui seule une très faible proportion d'empreintes, dans un environnement donné, peut fournir des informations taxinomiques sur les « individus » qui les ont laissées. McKeever & Haubold (1996) ont montré que plusieurs ichnotaxons permiers ne se rapportent en fait qu'à un seul et même individu, les variations de son comportement et du substrat sur lequel il s'est déplacé (évoluant dans des conditions variables de substrat) aboutissant à différentes morphologies d'empreintes.

Facteurs conditionnant la morphologie d'une empreinte

La morphologie d'une empreinte est conditionnée et affectée par les propriétés du substrat – consistance, composition du sédiment, taille des grains, texture, limite d'élasticité, contenu en eau, taux de consolidation – ainsi que par la présence et la nature d'un tapis microbien. Allen (1997) et Manning (2004) suggèrent que le contenu en eau et la limite d'élasticité du sédiment au moment de la formation de l'empreinte sont cruciaux et en conditionnent fortement la morphologie. Scrivner & Bottjer (1986) et Allen (1997) classent la morphologie des empreintes selon le contenu en eau (humidité) et l'élasticité du sédiment (boue) (fig. 53). Leur classification peut être résumée et subdivisée comme suit :

- 1) sec et dur, boue rigide et solide ;
- 2) humide ou légèrement humide, boue dure ;
- 3) insaturée en eau, boue molle ;
- 4) saturée en eau, boue semi-liquide.



Fig. 52. Morphologie d'une empreinte selon le contenu en eau et l'épaisseur du tapis microbien (modifié d'après Marty 2008).

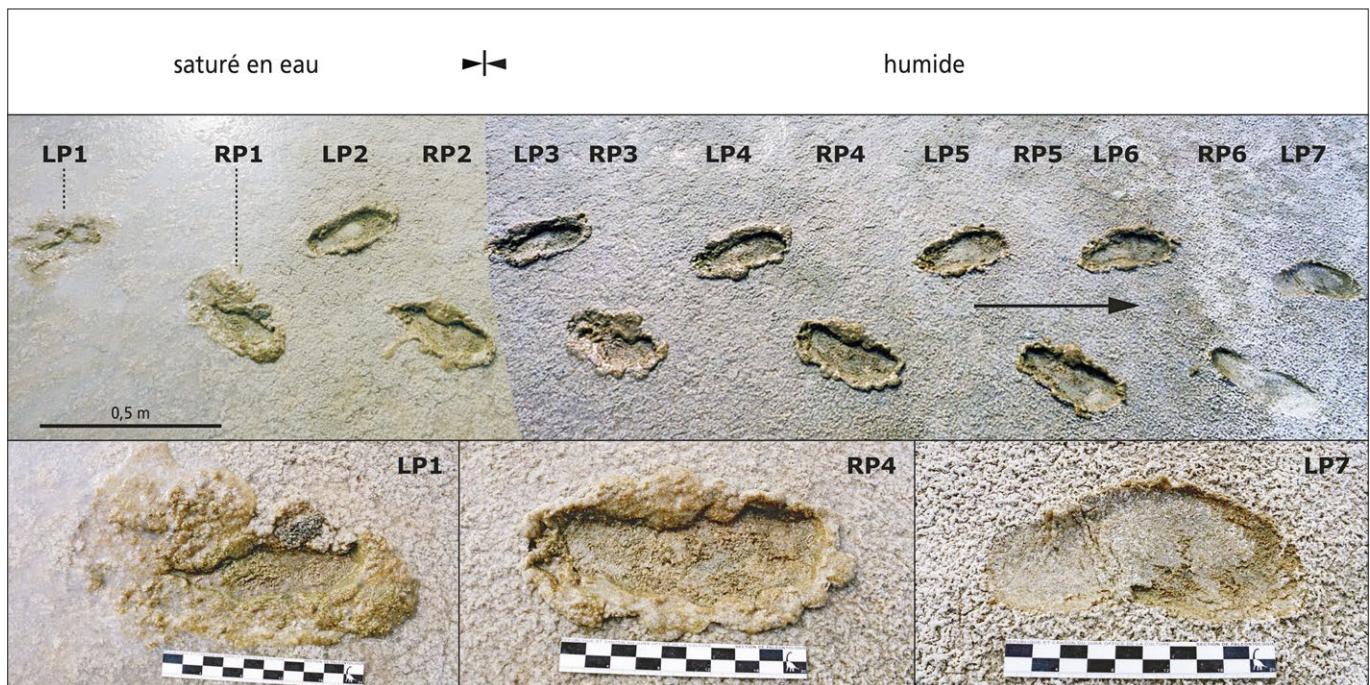


Fig. 53. Changements de la morphologie d'une empreinte sur une même piste en bordure d'un étang (Bahamas); un sédiment lithifiée était ici recouvert d'un tapis microbien épais de 3 à 5 cm, avec un contenu en eau variable (modifié d'après Marty 2008).

La limite de déformation (plastique ou par fracture) d'un tapis microbien dépend de son épaisseur et de son élasticité. La consistance du sédiment sous-jacent, la présence ou l'absence d'une couche lithifiée sous le tapis microbien et la proximité de la nappe phréatique constituent aussi des paramètres importants pour la formation et la morphologie de l'empreinte. La large panoplie de types de traces (« vraies » empreintes, sous-empreintes, empreintes « profondes ») pouvant être laissées par un seul individu résulte de la combinaison des diverses propriétés des tapis microbiens et de la qualité du sédiment sous-jacent (fig. 54).

Lorsqu'un tapis sec et consolidé recouvre un sédiment non consolidé et humide, une empreinte se forme uniquement si l'animal exerce une pression suffisante pour le rompre (« craquer »). Cela peut être le cas si le tapis microbien est très fin, ou si l'animal est très lourd. Un tapis sec et consolidé d'une épaisseur de 3 mm ou plus s'est avéré être soit très élastique soit, si déjà consolidé, très rigide et difficile à fracturer. En présence d'une nappe phréatique dont le niveau est élevé, il a été observé que les tapis microbiens secs et durs étaient fréquemment superposés à des sédiments non laminés insaturés à saturés en eau. Dans ce type de scénarios, le tapis se fracture autour du pied et est repoussé verticalement sous le pied, dans le sédiment. Cela conduit à la formation d'une « vraie empreinte » particulière puisque le sédiment sous-jacent est pénétré et compressé par le tapis lui-même; mais l'empreinte est quand même laissée sur la surface sédimentaire originelle (fig. 54a). Lorsque le tapis se fracture dans la partie centrale du pied et est poussé sur les bords de l'empreinte, il en résulte une « empreinte profonde » ou une « sous-empreinte » (fig. 54b). Dans ce cas, le tapis est encore légèrement plastique, ce qui peut expliquer la formation de stries verticales (fig. 54d) comme parfois observées sur les « empreintes profondes » (p. ex. Difley & Ekdale 2002; Milàn et al. 2005; Platt & Hasiotis 2006; Avanzini et al. 2011; Cobos et al. 2016).

Les empreintes morphologiquement les mieux définies sont laissées dans des tapis microbiens épais, humides à insaturés en eau, très plastiques, et superposés à un sédiment humide. Dans des tapis microbiens saturés en eau, les empreintes formées sont généralement mal définies. Si le tapis microbien saturé en eau superpose un sédiment déjà lithifié, il est parfois possible d'obtenir des empreintes assez bien définies. La formation de « bourrelets » (fréquemment observés autour des empreintes de grands dinosaures) a lieu de préférence dans des tapis microbiens épais, plastiques, humides à insaturés en eau, déposés sur un sédiment légèrement ferme, humide à insaturé. Les observations montrent que des impressions peu profondes laissées dans un sédiment humide à insaturé ont des morphologies mieux définies et peuvent être utilisées à des fins ichnotaxinomiques. Pendant les périodes de sécheresse, les tapis se consolident rapidement, devenant durs et rigides, et presque impossibles à déformer; sauf dans le cas d'un individu présentant un poids certain, mais le résultat est généralement mal défini. Résistants aux fortes pluies, les tapis microbiens permettent uniquement l'impression de nouvelles empreintes sur une communauté microbienne fraîche, après réhumidification. Ce phénomène réduit le délai autorisant l'enregistrement des

traces et diminue ainsi la durée de l'ichnocénose (ensemble de traces fossiles contemporaines associées dans leur milieu de formation originel).

Taphonomie d'une empreinte

L'enregistrement fossile d'une empreinte animale est fortement dépendant des processus taphonomiques intervenant après la formation de cette dernière (« track survivorship curves » de Cohen et al. 1991). Généralement, une trace exposée se dégrade rapidement après sa formation et présente un potentiel de préservation faible (fig. 54c). Le temps écoulé entre sa formation et son enfouissement influence sa préservation potentielle (Laporte & Behrensmeyer 1980; Cohen et al. 1993).

Plusieurs facteurs taphonomiques affectent l'empreinte après sa formation. Les processus destructifs incluent le piétinement par des vertébrés, des bioturbations d'insectes ou d'autres invertébrés, ou la croissance de racines par exemple. Des processus d'altération (fortes pluies, vents, dessiccation associée à des fractures), des déformations liées à la formation d'évaporites, des inondations, la conséquence des vagues ou des fluctuations de la nappe phréatique sont également des phénomènes destructifs potentiels (p. ex. Tucker & Burchette 1977; Laporte & Behrensmeyer 1980; Cohen et al. 1991; Demathieu 1991; Nadon 2001). Ces processus péjorent la préservation de l'empreinte ou du moins modifient ou effacent la « vraie empreinte » originelle, conduisant à l'obtention d'une « vraie empreinte modifiée » (Marty et al. 2009) (fig. 54c).

Les mécanismes taphonomiques qui favorisent la conservation d'une empreinte comprennent une cémentation précoce (du sédiment ou du tapis microbien), un recouvrement rapide par du sédiment et une croissance rapide du tapis microbien.

Des observations montrent que les tapis microbiens améliorent parfois la préservation de l'empreinte en liant et stabilisant le sédiment dans lequel l'empreinte a été laissée, par divers phénomènes: croissance rapide, consolidation par séchage et lithification (précipitation des carbonates dans le tapis et cémentation diagénétique précoce). A contrario, la conservation d'une « vraie empreinte » parfaitement définie requiert l'interruption de la croissance du tapis microbien et sa consolidation peu de temps après la formation de la trace. De plus, la surface piétinée doit être recouverte de sédiment avant le développement d'une nouvelle communauté microbienne. La croissance continue du tapis après la formation de la trace permet non seulement de considérer l'empreinte, mais peut également couvrir ou masquer sa morphologie originelle (fig. 55), produisant alors une « surempreinte » (fig. 54c).

Il a été constaté que le tapis microbien peut s'épaissir au sommet des reliefs positifs tels que les bourrelets. Par contre, si de l'humidité subsiste, à l'intérieur d'une empreinte profonde par exemple, le tapis microbien continue de croître à cet endroit mais pas autour, ce qui conduit à son remplissage lent, créant ainsi une « surempreinte » interne. La croissance des tapis est également tributaire de la sédimentation (fig. 56).

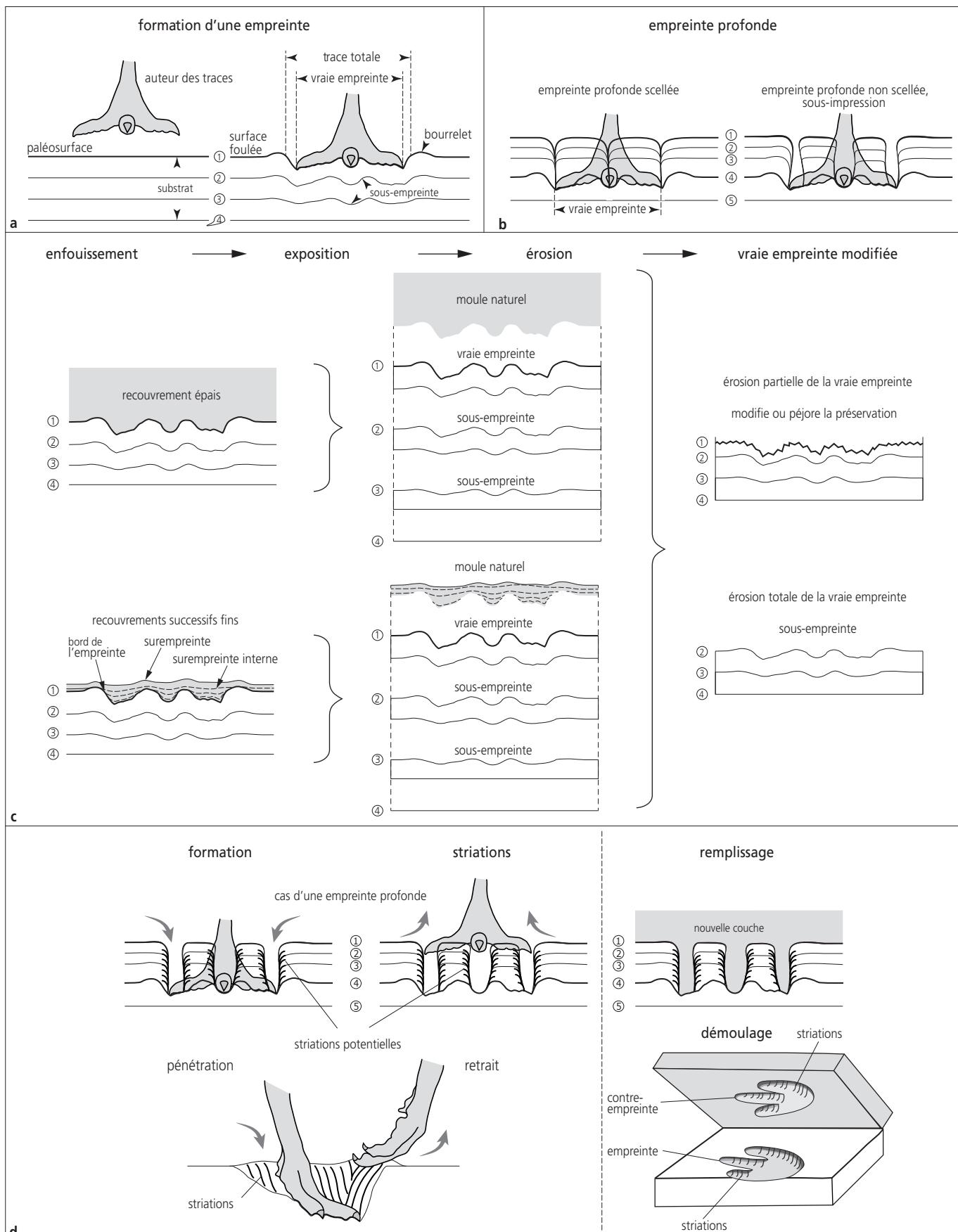


Fig. 54. Schéma expliquant la formation des traces et précisant les différents termes (modifié d'après Falkingham 2015 et Marty 2008). Sections longitudinales schématiques permettant d'expliquer la terminologie. a) modèle de formation d'une empreinte par compression de sédiment stratifié sous l'effet de la pression du pied; b) modèle de formation d'une empreinte profonde: le pied transperce la couche sur laquelle il se pose: l'impression n'est pas laissée sur la surface foulée mais au-dessous; c) évolution d'une empreinte dans le temps, après enfouissement, exposition et érosion, plus on descend dans la série de laminites, moins les empreintes seront marquées; d) explications de la formation de stries verticales parfois observées sur les empreintes profondes.



Fig. 55. Empreinte de sauropode modifiée par la croissance de tapis microbien pustuleux.



Fig. 56. Vue en coupe d'un bourrelet d'une empreinte de sauropode. On peut observer que la surempreinte interne visible à la droite du bourrelet provient de la croissance répétée de tapis microbien lisses à l'intérieur.

En se basant sur des modèles informatiques, Henderson (2006a) postule que l'altération d'une « vraie empreinte » tridactyle ne peut être confondue avec une « sous-empreinte ». Cependant, selon leur degré de modification, les « vraies empreintes » sont difficiles à identifier sans ambiguïté parce qu'elles apparaissent très ressemblantes aux « surempreintes ». Par ailleurs, accrétion et érosion pouvant intervenir à différentes échéances, une trace peut donc être partiellement remplie de sédiments à plusieurs reprises, ou alors vidée, partiellement ou complètement, de son sédiment (Allen 1997). Dans le cas d'une sous-impression, la partie supérieure peut avoir subi des modifications liées à l'érosion avant l'ensevelissement final. Les « vraies empreintes » peuvent présenter des impressions de phalanges et/ou de griffes, permettant, dans le meilleur des cas, d'attribuer l'empreinte de manière plus précise à un groupe de dinosaures.

Consolidation de l'empreinte

La consolidation rapide d'une empreinte est décisive pour prévenir sa perforation ou sa déformation avant ou pendant son enfouissement (Phillips et al. 2007). Les observations montrent qu'une trace consolidée ou partiellement lithifiée est communément retrouvée dans un environnement intertidal supérieur et plus particulièrement sur les plateformes et marais supratidiaux. Ces empreintes présentent une large panoplie d'états de préservation, liés principalement à la consistance du substrat au moment de la formation, aux différents degrés de croissance et/ou à la prolifération des tapis microbiens et de leur composition.

Enregistrement sédimentaire d'une empreinte

C'est finalement le contexte sédimentaire qui détermine si la préservation a lieu et si une empreinte est incorporée à l'enregistrement sédimentaire. La probabilité de préservation d'une empreinte est minimale lors d'une longue période d'exposition sans sédimentation, et elle est favorisée dans le cas d'événements de préservation rapides et conséquents. Les traces sont ainsi la plupart du temps préservées dans des environnements soumis à des accumulations périodiques ou cycliques de sédiments (Thulborn 1990), typiquement observés sur les plateformes marines.

Alors que la partie supérieure de la zone intertidale est inondée à chaque marée haute, l'inondation de la plateforme supratidale et des marais a lieu uniquement en cas de marée haute exceptionnelle ou de tempête conduisant à l'apport soudain d'eau chargée de sédiments, même loin à l'intérieur de la zone côtière (p. ex. Roehl 1967; Monty 1972; Hardie 1977a; Boss & Neumann 1993; Rankey et al. 2004; Bourrouilh-Le Jan 2007). D'importants influx de sédiments dissimulent par recouvrement les surfaces piétinées. Au sommet de ces couches de sédiments, de nouveaux tapis microbiens peuvent croître et les protéger de la désintégration (Hardie & Ginsburg 1977). Simultanément, de nouvelles traces peuvent se créer dans ces tapis aussi longtemps qu'ils resteront humides. Ainsi, des épisodes de sédimentation répétitifs liés à la marée et/ou à des tempêtes conduisent à la préservation successive de biolaminites comportant des empreintes. À de plus grandes échelles de temps, la préservation (potentielle) d'empreintes est plus probable pendant les phases de transgression, lorsque de nouveaux espaces d'accommodation sont créés (p. ex. Lockley et al. 1992). Durant les périodes de régression (diminution du niveau marin), le potentiel d'érosion étant favorisé, les surfaces à empreintes auront plutôt tendance à être détruites.

Implications pour l'étude des empreintes

La distinction problématique entre « vraies empreintes » et « sous-empreintes » est connu depuis bien longtemps dans l'histoire de l'ichnologie des vertébrés (Hitchcock 1858). Cette distinction est importante puisque seules les « vraies empreintes » peuvent fournir des informations utiles et pertinentes pour l'étude ichnotaxinomique et paléoécologique. Cette problématique est rendue encore plus complexe par la présence de « vraie empreintes » avec des caractéristiques extramorphologiques (n'ayant aucun lien avec la morphologie de l'extrémité de l'animal), de « vraies empreintes modifiées » et de « surempreintes ». Nadon (2001) et Milàn & Bromley (2006) postulent que les « sous-empreintes » sont toujours moins détaillées que les « vraies empreintes ». Cependant, dans le cas d'une « vraie empreinte fortement modifiée », la sous-empreinte peut révéler plus d'informations sur l'individu ayant laissé sa trace (Milàn et al. 2004) ou sur son comportement (Avanzini 1998; Gatesy et al. 1999).

Des observations montrent que les « surempreintes consolidées » et les « vraies empreintes modifiées » sont fréquentes dans les environnements de plaines tidales actuelles. Même si elles ne présentent jamais plus de détails anatomiques que les « vraies empreintes », il est pourtant parfois difficile de les distinguer de ces dernières. Il semble que les « vraies empreintes modifiées » et les « surempreintes » sont communément incorporées à l'enregistrement sédimentaire et représentent probablement un pourcentage important des empreintes fossiles, alors que les « vraies empreintes » bien préservées (non modifiées), qui peuvent être facilement identifiées comme telles, représentent plutôt des exceptions. Lors de la fouille dans des biolaminites fossiles, la roche ne se fissure pas nécessairement sur la surface originelle, des « surempreintes et sous-empreintes » sont donc très fréquemment observées. Les « sous-empreintes » sont relativement faciles à incorporer à l'enregistrement sédimentaire puisqu'elles sont à l'intérieur du sédiment au moment de la formation, alors que la « vraie empreinte originale » peut être érodée avant son enfouissement (Lockley 1991b). Néanmoins, il est important de souligner que la probabilité d'avoir affaire à de « vraies empreintes modifiées » ou à des « surempreintes » ne doit pas être négligée quand on cherche à distinguer « vraies empreintes » et « sous-empreintes » (fig. 54).

6.1.1.3 Applications

Dans le terrain, les objectifs principaux ont été de documenter des sites voués à disparaître de manière à ce que les données soient utilisables pour :

- 1) identifier les vraies empreintes, les sous-empreintes et les surempreintes, de définir leur lien avec les propriétés du substrat, l'indice d'exposition et leur utilité pour la reconstitution du paléoenvironnement;
- 2) définir les implications de l'assemblage ichnologique pour reconstituer le comportement des dinosaures, le paléoécosystème terrestre et l'ichnofaciès;
- 3) définir les liens entre la variabilité des profils (le degré de recouvrement de la main par le pied) et des configurations des pistes par rapport aux vitesses de déplacement, au comportement et aux propriétés du substrat, leurs implications sur la locomotion;
- 4) comprendre la signification de la (variation de la) largeur de voie des pistes de sauropodes;
- 5) interpréter des pistes ou des assemblages de pistes particuliers.

Une connaissance de base de l'ichnologie ainsi qu'une nomenclature précise sont des conditions nécessaires à une documentation *in situ* optimale. Une définition claire de certains paramètres ichnologiques et sédimentologiques, avant de débuter sur le terrain l'analyse d'une surface, permet d'assurer une bonne compréhension des données mesurées et d'assurer ainsi une homogénéité de la documentation. La terminologie ci-dessous définit les notions qui sont à la base de l'étude de terrain et qui assurent des relevés scientifiques de qualité.

Depuis 2002, sur les sites de la Transjurane, des balayages laser avec un scanner CyraX 3D et des orthophotographies sont

systématiquement réalisés sur les surfaces les plus importantes. Par combinaison, ils permettent ensuite d'obtenir un modèle en trois dimensions de la surface, d'une précision millimétrique. Si cette méthode est satisfaisante pour une empreinte de sauropode, elle peut être limitante pour l'étude détaillée de celle d'un petit théropode.

Afin d'atteindre un bon niveau de précision et de pouvoir réaliser l'analyse ichnologique détaillée en une seule étape, une préparation adéquate des surfaces *in situ* est indispensable. Dans l'idéal, la numérotation, la mesure des paramètres, les descriptions scientifiques et tous les types de documentation (photos, orthophotos, relevés des empreintes, balayages laser, etc.) ne devraient pas être réalisées avant l'analyse complète de la surface : beaucoup d'erreurs peuvent en découler. Pour exemple, si des empreintes sont découvertes après la phase d'analyse, des problèmes de numérotation et d'oubli dans la documentation systématique peuvent rapidement se poser et sont difficiles à résoudre.

Une bonne connaissance des couches et de leur sédimentologie est également indispensable pour une interprétation correcte des interactions entre l'empreinte et le substrat ou entre les empreintes elles-mêmes. Afin d'assurer une cohérence entre les analyses des différents niveaux rencontrés, il est recommandé de définir des standards clairs autorisant une interprétation optimale des données. De plus, l'analyse, les mesures et les descriptions devraient, dans l'idéal, être effectuées ou coordonnées par une seule et même personne durant tout le travail de terrain, permettant ainsi d'améliorer considérablement la qualité des comparaisons et l'homogénéité de la documentation.

Préparation des surfaces

La première étape, après la découverte d'une surface à éléments ichnologiques, consiste à réaliser un nettoyage au balai et au jet à pression, dans la mesure du possible. Cela permettra d'assurer une lisibilité adéquate des empreintes et des figures sédimentaires. Il est important, ici, de s'assurer d'être en présence d'une seule et même surface.

Parfois accidentée en raison de nombreuses failles et de décrochements tectoniques, la surface d'une couche peut se révéler compliquée à suivre. Une fois encore, une bonne connaissance de la sédimentologie de la couche permet généralement de s'y retrouver. Après le nettoyage, il s'avère parfois encore nécessaire de supprimer des placages ou des remplissages, restés sur ou à l'intérieur de l'empreinte et pouvant en altérer la lecture (fig. 57).

Analyse et marquage du contour de empreintes

Une fois la surface parfaitement préparée, la phase d'analyse peut débuter. Pour ce faire, les lumières naturelles idéales sont celles du lever ou du coucher du soleil (fig. 58a,b). Une lumière perpendiculaire a tendance à aplatiser les reliefs, ce qui rend le travail difficile. Toutes les empreintes sont systématiquement contournées à la craie grasse, qu'elles soient immédiatement attribuables à un



a



b



a



b

Fig. 57. Préparation de surfaces pour analyse: a) balayage; b) jet à pression.

individu ou non, pour que le trait résiste à la pluie mais demeure réversible (fig. 58c). Cette étape achevée, une recherche nocturne peut être programmée pour affiner l'identification (fig. 59 et 60). Il est fréquent que certaines empreintes apparaissent de nuit, en lumière artificielle rasante, alors qu'elles sont pratiquement illisibles en plein jour! Cette étape permet également de s'assurer qu'aucune empreinte n'a été oubliée avant de débuter la numérotation. Elle est particulièrement utile sur des surfaces avec beaucoup de petites empreintes.

Identification et numérotation des pistes

L'étude ichnologique est surtout intéressante lorsque le niveau stratigraphique concerné présente des pistes, c'est-à-dire une succession d'au minimum trois empreintes du même individu. Ce n'est qu'à partir de pistes que des interprétations plus approfondies peuvent être posées. Certaines pistes, notamment celles de sauropodes, sont en général assez faciles à suivre. Pour cette phase du travail, il faut se munir d'un outil de mesure (mètre) afin de s'assurer de la cohérence de la succession entre les empreintes. L'identification peut se complexifier en cas d'intersection de plusieurs pistes (fig. 61c), d'une grande densité d'empreintes (degré élevé de «dinoturbation»), de diminution de profondeur des empreintes ou lors de la recherche des traces de petite taille, ce qui est souvent le cas des empreintes tridactyles sur les sites de la Transjurane. De plus, il est fréquent d'être confronté à des empreintes encore camouflées par un fin placage (remplissage)



Fig. 58. Vues d'empreintes en lumière rasante: a-b) après nettoyage et avant marquage; c) après marquage à la craie.

qu'il est nécessaire d'enlever pour les révéler. Contrairement à d'autres fossiles, le cas particulier des empreintes nécessite une documentation complète *in situ*, d'autant plus qu'elles sont de toute façon vouées à disparaître par recouvrement ou destruction dans le cas des fouilles autoroutières. La documentation des empreintes (mesures et descriptions) ne peut avoir lieu en laboratoire, par la suite, car il est difficile de prélever les empreintes et donc primordial d'étudier la globalité et pas que l'empreinte détachée de son contexte. Une documentation systématique a ainsi été mise en place afin d'assurer la sauvegarde des informations principales avant leur disparition sous le tracé de l'A16.



Fig. 59. Vue nocturne d'empreintes sauropodées en lumière artificielle rasante.

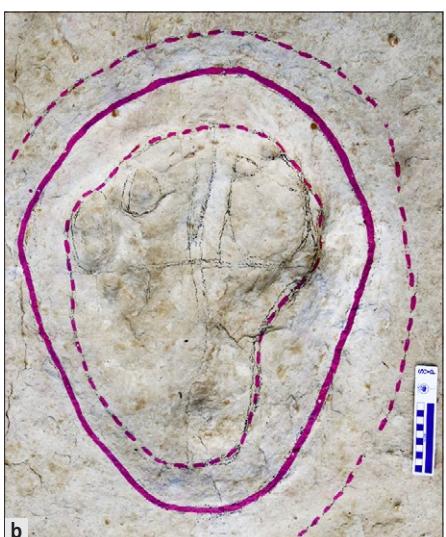
Une fois la piste identifiée en entier, sur toute l'étendue du site, il est nécessaire, si possible, de la mettre en évidence avec de la peinture ou un feutre marqueur, par-dessus les traits réalisés au préalable à la craie. Le choix sera dicté par le substrat, le temps à disposition, les dimensions du site et les conditions météorologiques, en accord avec les standards prédéfinis (fig. 61a,b).



Fig. 60. Vue nocturne d'empreintes tridactyles en lumière artificielle rasante.



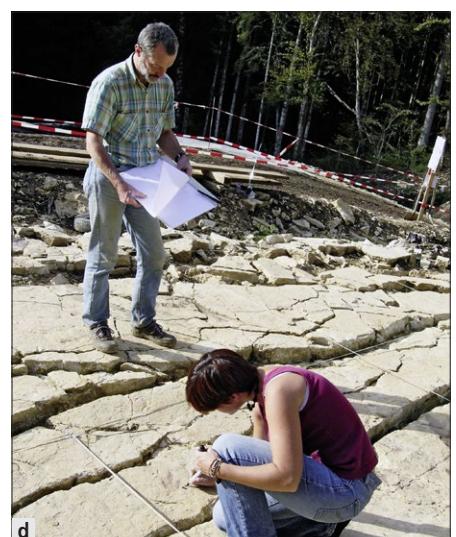
a



b



c



d

Fig. 61. a-b) Mise en évidence d'empreintes avec de la peinture; c) croisement de plusieurs pistes de sauropodées illustrant la complexité de l'interprétation; d) numérotation d'une piste de théropode.

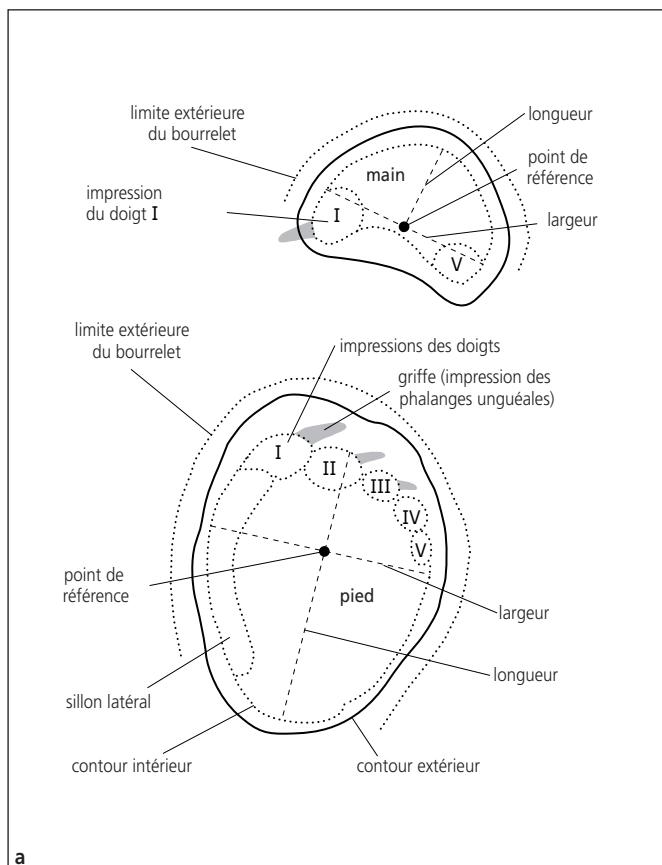
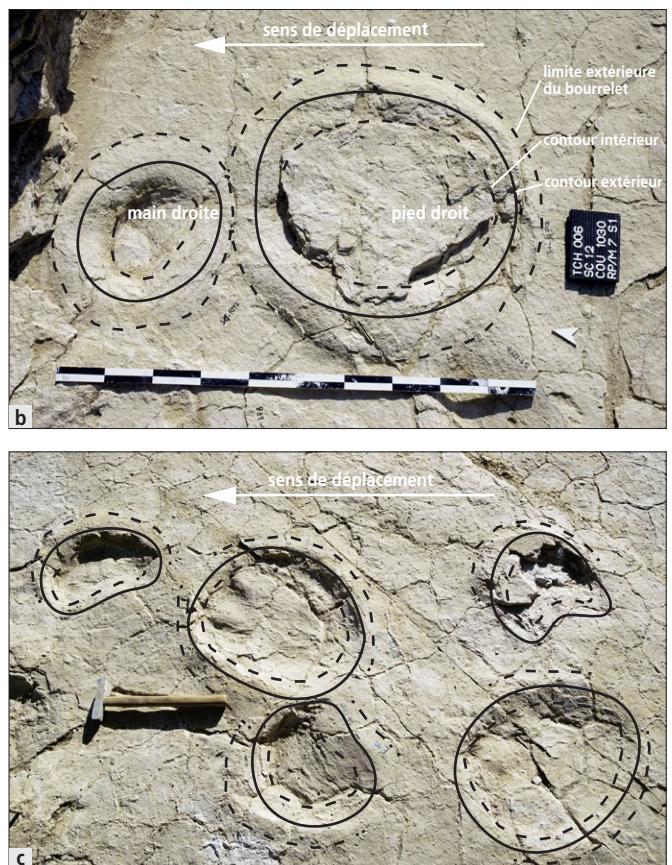


Fig. 62. a) représentation schématique des contours d'une empreinte de « pied » et de « main » de sauroptérygiens. Elle a pour but d'indiquer les différents types de lignes utilisées; b-c) exemples des contours indiqués sur une paire « pied/main » de sauroptérygiens et sur une piste de sauroptérygiens.

un modèle identique, ce qui limitera considérablement d'éventuelles incohérences. L'utilisation de lignes pour la représentation des empreintes et des pistes permet de mettre en évidence leurs caractéristiques principales. Cependant, il est nécessaire de les considérer avec réserve puisqu'il s'agit d'une projection, d'une interprétation d'un objet complexe en trois dimensions.

La ligne continue correspond au pourtour extérieur de l'empreinte de dinosaure, tel qu'il apparaît en surface: il s'agit de l'intersection entre le bord de l'empreinte et la surface piétinée. Elle représente aussi la crête du bourrelet, dont la limite extérieure est matérialisée par une ligne traitillée. L'absence d'une telle ligne (traitillée à l'extérieur de la ligne continue) signifie que la trace ne comporte aucun bourrelet. La ligne traitillée tracée à l'intérieur de la ligne continue marque le contour intérieur de l'empreinte: elle représente le pourtour « réel » du pied et définit de la sorte sa taille. Une seule, deux ou trois lignes traitillées indiquent des empreintes au contour incertain; elles ne sont généralement pas prises en compte dans les mesures des paramètres, ou à titre indicatif seulement. Les impressions des doigts ou des phalanges sont indiquées par des lignes traitillées; celles des griffes le sont de même par des lignes continues remplies en noir (fig. 62; chap. 6.2.1 et 6.3.1).

Il est également nécessaire, et en parallèle, de numérotter la couche et les empreintes de manière définitive selon les standards mis en place. Finalement, un contrôle global appliqué sur



toute la superficie de la couche, parfois en nocturne dans le cas de difficultés rencontrées avec certaines pistes, clôt cette étape permettant de débuter la documentation (fig. 61d; chap. 6.1.4).

6.1.1.4 Synthèse

L'intégration d'une « vraie empreinte non modifiée » dans l'enregistrement sédimentaire nécessite des conditions très particulières. La présence de tapis microbiens est un paramètre significatif pour la préservation de l'empreinte dans un environnement de plaine tidale actuelle. Une trace imprimée peut soit se consolider par simple dessiccation du tapis microbial, soit par lithification due à la précipitation carbonatée à l'intérieur. Parmi les empreintes consolidées, des « vraies empreintes mal définies », des « vraies empreintes modifiées » et des « surempreintes » sont fréquemment observées. De telles empreintes sont difficilement utilisables pour l'ichnotaxonomie mais peuvent être des outils valables pour des reconstitutions paléoenvironnementales et paléoécologiques, lorsqu'elles sont associées à des évidences sédimentaires (Marty 2008). Les « vraies empreintes modifiées » et les « surempreintes » sont fréquemment incorporées à l'enregistrement sédimentaire et elles en représentent un grand pourcentage. Elles sont en fait plus communes que les « sous-empreintes ». Puisque les biolaminites fossiles ne se fissurent pas souvent sur la surface de formation des traces d'origine, les « surempreintes et sous-empreintes » apparaissent fréquemment dans les fouilles. Dans l'enregistrement fossile, la distinction sans équivoque entre les « vraies empreintes mal définies », les « vraies empreintes modifiées », les

«sous-empreintes» et les «surempreintes» demeure une tâche laborieuse. Les «vraies empreintes» peuvent être identifiées comme telles uniquement lorsqu'elles présentent des détails anatomiques, par une fouille et une documentation systématiques couche par couche, et/ou si des informations supplémentaires sont recueillies par analyse sédimentologique de la surface ou des couches sus-jacentes et sous-jacentes. Cela souligne l'importance d'une analyse systématique en trois dimensions des empreintes, combinée à l'analyse sédimentologique.

La superposition niveau par niveau des surfaces étudiées permet de discerner les «vraies» empreintes, les sous-empreintes et les surempreintes. Les «vraies» empreintes les mieux définies (morphotypes anatomiques) sont utilisées pour l'ichnotaxinomie et l'identification de l'auteur des traces. Les analyses détaillées des paramètres de pistes, incluant la largeur de voie, fournissent des informations sur le mode de déplacement des dinosaures. La variabilité des pistes reflète les capacités locomotrices des animaux. Elle est l'expression de différents types de locomotion et de comportements individuels, liés aux propriétés du substrat notamment. Le profil et les différentes configurations de pistes (incluant la largeur de voie) ne sont pas uniquement liés à la vitesse de déplacement.

Ces chapitres soulignent l'importance d'analyses systématiques d'échantillons riches en traces et en pistes de dinosaures, afin de discerner la variabilité due au comportement des animaux et aux propriétés du substrat. Des approches statistiques et quantitatives appliquées aux études menées sur la très grande base de données des ichnocénoses de la Transjurane montrent les difficultés et les limites des interprétations mais permettront de mieux comprendre le paléoécosystème dinosaurien de la plate-forme carbonatée du Jura, de même que le comportement et la paléoécologie de ces animaux.

Terminologie

Terme en français; terme utilisé en anglais (le synonyme indiqué entre parenthèses n'est plus utilisé)

Auteur des traces; trackmaker (track maker)

Animal, individu, ayant laissé ses traces (fig. 54).

Bords de l'empreinte; track wall

Parois verticales ou inclinées entourant le fond d'une empreinte (Brown 1999). Les bords de l'empreinte correspondent à la pente qui débute au fond de l'empreinte (ligne intérieure) et qui se termine soit à l'intersection avec la surface, soit au sommet du bourrelet si celui-ci est présent (fig. 54 et 61b).

Bourrelet; displacement rim (raised rim, expulsion rim, bourrelet)

Dépendant de la consistance du sol foulé, un bourrelet marginal provient d'une déformation du substrat. Il se forme autour d'une empreinte. Des chevauchements ou des fractures radiales peuvent parfois être observés dans le substrat autour de l'empreinte (Allen 1997 ; Manning 2004) (fig. 54).

Configuration des pistes; trackway configuration

Chez les quadrupèdes, la configuration de la piste se rapporte aux caractéristiques générales de la piste, comme la largeur, l'arrangement des empreintes de pieds et de mains (distance par rapport à la ligne médiane) ou leur orientation (degré de rotation).

Consistance du substrat; substrate consistency

La consistance du substrat dépend des propriétés physiques (taille et nature des grains du sédiment, présence de tapis microbien) et de son contenu en eau (sec, humide, insaturé en eau et saturé en eau/mouillé). En résumé, la consistance du substrat peut varier de ferme à semi-fluide au moment de la formation de l'empreinte.

Consolidation et lithification d'une trace; track consolidation and lithification

Le terme de consolidation est utilisé en néoichnologie (étude des traces modernes) pour décrire les empreintes qui sont cohésives ou dures et difficiles à désintégrer. Ce phénomène est souvent en lien avec la présence d'un tapis microbien sec et cohésif. Une couche consolidée est rigide et dure mais pas nécessairement lithifiée.

La lithification signifie que le substrat a été (en tout cas partiellement) stabilisé par une sédimentation précoce, par précipitation des carbonates par exemple.

Dinoturbation; dinoturbation (trampling)

Dérivé du terme bioturbation, très fréquemment utilisé en ichnologie des invertébrés, dinoturbation est un synonyme de «piétinement». Défini à l'origine par Lockley & Conrad (1989), ce terme peut varier entre dinoturbation légère, dinoturbation modérée et dinoturbation importante selon le taux de déformation du substrat.

Empreinte, trace; track (footprint, print)

Le terme «empreinte» s'utilise comme synonyme de trace, et se rapporte aux éléments individuels qui composent la «piste». Il correspond à une impression (ou une partie) de l'autopode de l'animal (Leonardi 1987). Si l'animal laisse une impression d'une autre partie de son corps, telle que la queue, elle portera son nom combiné avec «empreinte ou trace», empreinte de queue, par exemple.

Empreinte profonde; deep track

Une empreinte profonde se forme lorsque le pied s'enfonce dans un substrat mou et pénètre en profondeur. Dans ce cas, le pied laisse une «vraie» empreinte sur la surface touchée par le pied à l'intérieur du substrat. Après le retrait du pied, l'empreinte est recouverte, au moins partiellement, et forme une empreinte profonde. Aucune vraie empreinte n'est donc clairement visible sur la surface foulée (Gatesy et al. 1999). Selon le degré de plasticité du sédiment, l'empreinte présente en surface des doigts très fins avec bords plongeant abruptement ou peut être pratiquement invisible. En coupe, de telles empreintes révèlent des informations sur la manière dont le pied a été posé (Gatesy 2003) (fig. 54).

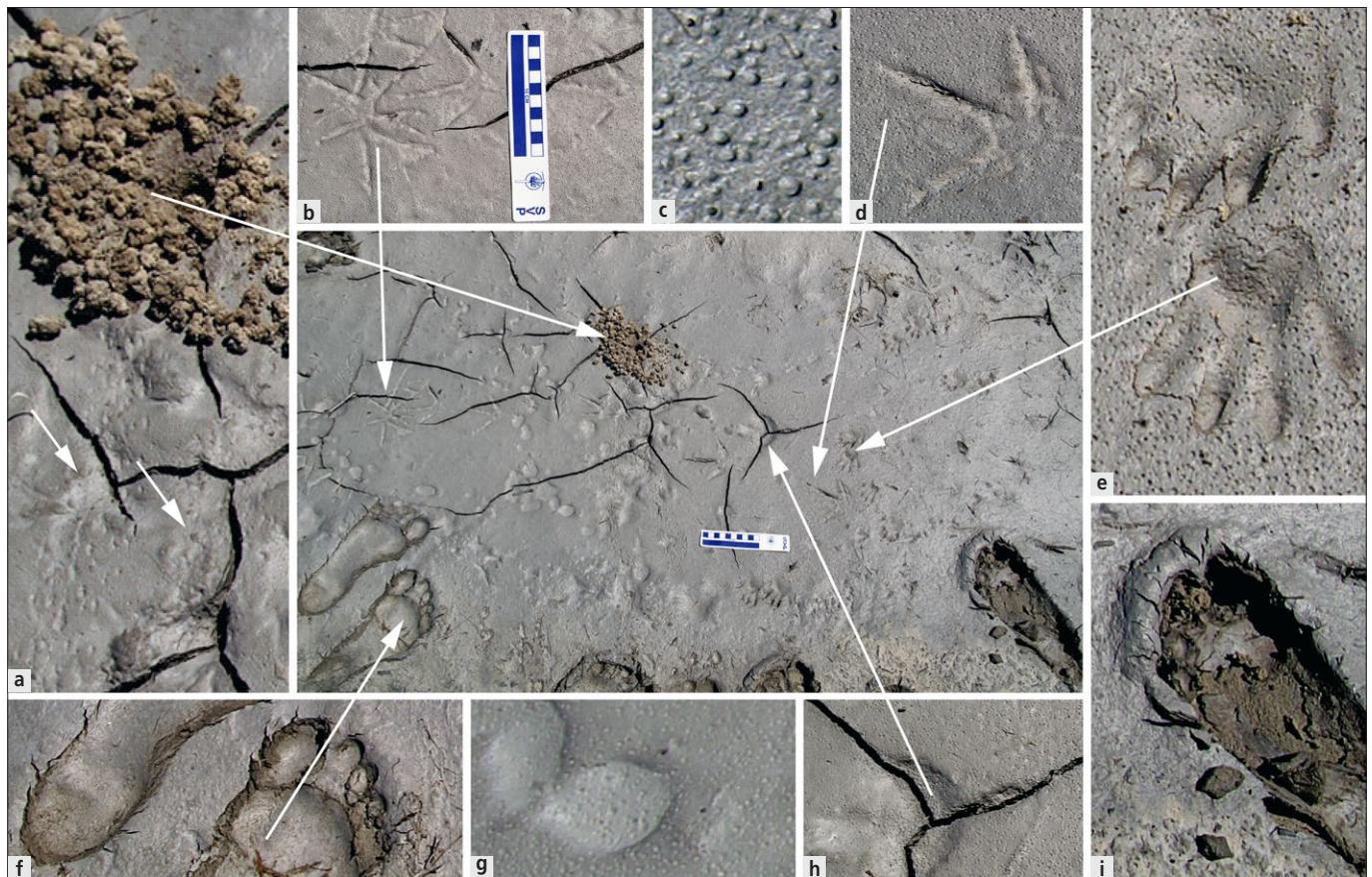


Fig. 63. Le concept d'ichnoassemblage de vertébrés illustré par l'exemple d'un tapis microbien provenant d'une zone supratidale au sud de San Pedro (Ambergris Caye, Belize) (modifié d'après Marty 2008). Les photos ont été prises après de fortes pluies lorsque la surface permettait à des empreintes de se former et d'être enregistrées. Deux jours plus tard, la même surface était complètement desséchée et les traces consolidées. a) terrier avec pellets d'un crustacé; b) traces d'oiseau de rivage laissées dans une zone de sédiment plutôt ferme; c) petites marques de gouttes de pluie ou structure formées par le dégazage du sédiment; d) trace d'un oiseau de rivage relativement bien définie; e) traces d'iguane bien définies, avec les impressions des griffes, organisées en une piste; f) empreintes de pied bien définies, avec les impressions des orteils, laissées par D. Marty; g) marques de grandes gouttes de pluie; h) fentes de dessiccation initiales; i) empreinte assez bien définie, entourée de bourrelets. Cette trace peut être considérée comme une sous-empreinte puisque la couche superficielle a été poussée vers l'extérieur et pénétrée.

Hétéropodie; heteropody

L'hétéropodie, définie par Lockley et al. (1994b), représente la différence de surface (surface totale de l'empreinte) entre les empreintes des pieds et celles des mains dans une piste donnée d'un animal quadrupède. L'hétéropodie est fréquemment utilisée dans la classification des pistes de sauropodes mais il est souvent difficile d'établir précisément comment elle a été quantifiée.

Ichnoassemblage; ichnoassemblage

Un ichnoassemblage comprend un seul niveau à empreinte, spatialement restreint. Selon Lucas and Hunt (2007) c'est un des trois termes fondamentaux en ichnologie, les deux autres étant ichnocénose et ichnofaciès (définis ci-dessous). Ces trois termes sont répartis selon une hiérarchie distincte (fig. 63).

Ichnocénose; ichnocoenosis

Ce terme fait référence à des ichnoassemblages récurrents (Hunt & Lucas 2006, 2007); il ne se limite pas à un assemblage d'empreintes sur un horizon unique. Ce terme peut être utilisé dans un sens plus général pour sous-entendre qu'un ichnoassemblage représente une « communauté » vivante.

Ichnofaciès; ichnofacies

Un ichnofaciès est un ichnoassemblage ou une ichnocénose récurrents, d'envergure régionale, associés à un faciès sédimentaire similaire. D'abord défini par Lockley et al. (1994) comme un ichnofaciès de vertébrés avec des préférences pour un faciès.

Ichnofaune; ichnofauna

Terme fréquemment utilisé mais plutôt vague, pour désigner un ichnoassemblage, une ichnocénose ou un ichnofaciès, d'étendue locale ou régionale. Souvent utilisé de manière générale pour faire référence à des ichnoassemblages, ichnocénoses ou d'autres catégories de traces fossiles provenant de zones géographiques ou d'unités géologiques particulières.

Moule naturel; natural track cast (mould, track fill)

Sédiment lithifié remplissant (entiièrement) une vraie empreinte, créant ainsi une réplique négative (en un hyporelief convexe) de l'empreinte (Lockley 1991) (fig. 54).

Paléosurface; paleosurface

Une paléosurface correspond à la surface d'un ancien relief préservée dans l'enregistrement rocheux avec sa topographie

originelle et sa silhouette de surface intacte (Smith 1993; Widdowson 1997). La plupart des paléosurfaces, avec empreintes de tétrapodes, sont liées à une exposition subaérienne (au moins partielle), même si certaines (notamment avec des empreintes profondes, des empreintes de nage ou des rides de courants) n'ont jamais ou seulement partiellement (ou après formation de l'empreinte) été soumises à une telle exposition (fig. 54).

Paramètres de trace/piste; *track/trackway parameters*

Ces paramètres permettent de décrire les caractéristiques d'une piste (Romano et al. 2007). Même si la plupart des paramètres sont mesurés de la même manière, beaucoup de terminologies différente existent pour leur mesure (Baird 1952; Haubold 1971; Leonardi 1987; Lessertisseur 1955; Lockley 1991c; Peabody 1948, 1959; Thulborn 1990) (chap. 6.1.4).

Piste; *trackway (track)*

Série d'empreintes attribuées à un seul individu. Se rapporte généralement à un minimum de trois empreintes successives (Leonardi 1987; Thulborn 1990).

Préservation d'une empreinte; *track preservation*

Des critères qualitatifs relatifs à leur préservation ont été mis en place pour procéder à la description scientifique des empreintes. Les empreintes sont ainsi « mal », « assez bien », « bien » ou « très bien » préservées ou définies. Le premier se réfère aux empreintes avec contour brut ou grossier du pied, sans aucun détail anatomique visible. Le dernier se rapporte à une trace « élite » avec contour bien défini et impressions de doigts (coussinets de phalanges, phalanges), des griffes voire la peau. « Assez bien » ou « bien préservé » s'appliquent à des empreintes dont les détails anatomiques permettent de les identifier en tant que « vraies » empreintes. De « vraies » empreintes mal préservées sont difficiles à identifier comme telles: il est facile de les confondre avec des sous-empreintes ou des surempreintes, ou vice versa.

Profil des pistes; *trackway pattern*

Se réfère à « l'allure » générale de la piste d'un animal quadrupède. Selon la présence ou l'absence d'empreinte de pied ou de main, cinq profils peuvent être décrits (chap. 6.1.4).

Site à traces; *tracksite*

Un site à traces est une étendue naturelle *in situ*, composée d'un ou de plusieurs niveaux avec empreintes. S'il est constitué de différents horizons, cela doit être clairement spécifié et ils doivent être numérotés distinctement.

Sous-empreinte; *undertrack (transmitted print/track/relief, ghost print)*

Ce terme se rapporte à une empreinte, formée dans un substrat laminé et plastique, lorsque le pied ne pénètre pas le sédiment mais le compresse verticalement, créant ainsi une séquence stratigraphique miniature, une superposition de sous-empreintes (empilement de « moules ») (Thulborn 1990; Lockley 1991). Les sous-empreintes sont formées dans un substrat très laminé ou finement lité mais pas dans les couches épaisses à substrat homogène.

Après consolidation, la séquence sédimentaire peut se fendre sur différents plans de stratification successivement plus profonds (qui ne correspondent pas nécessairement à des paléosurfaces) et révéler des changements dans les paramètres de la trace (longueur, largeur ou profondeur, p. ex.) sur les différents horizons (Thulborn 2012) (fig. 54).

Sous-impression; *underprint (fig. 54b)*

Ce sont des vraies empreintes, produites lorsque le pied pénètre ou brise la surface foulée et/ou plusieurs couches dans le substrat, amenant la création d'une vraie empreinte sur une surface située au-dessous de la surface foulée. Les sous-traces peuvent aussi correspondre aux empreintes profondes non scellées. Elles représentent des structures tridimensionnelles complexes qui, associées à leur moule naturel livrent des enregistrements importants de l'anatomie du pied et de la cinématique (Avanzini et al. 2012; Falkingham & Gatesy 2014; Gatesy et al. 1999)

Striations; *striations (fig. 54d)*

Les striations sont des impressions laissées par des tubercules de la peau ou par des griffes durant le déplacement. Elles peuvent servir à reconstituer les mouvements du pied.

Substrat; *substrate (medium, soil, sediment)*

Le substrat est le support physique sur lequel un individu se déplace en laissant ses traces. N'importe quelle combinaison de sédiment et de taille de grains peut être observée dans les différentes lithologies des empreintes fossiles (fig. 54).

Surempreinte; *overtrack (overprint)*

Une surempreinte est observée sur l'horizon recouvrant les empreintes s'il y a apport de sédiment et/ou par croissance répétée de tapis microbiens. Un événement de sédimentation rapide et important peut aussi enterrer l'empreinte entière ainsi que la surface à traces sans laisser aucune surempreinte. Dans un tel cas, il peut se former un moule naturel homogène de la trace totale.

Surempreinte interne; *internal overtrack*

Une surempreinte interne se forme par recouvrement du fond d'une vraie empreinte, sans que le pourtour de l'empreinte ne soit entièrement recouvert. Les surempreintes internes sont généralement induites par la croissance répétée de tapis microbiens dans la partie intérieure de l'empreinte, encore humide, par piégeage de sédiment, par altération ou par combinaison de ces deux processus (Marty et al. 2009) (fig. 54).

Surface foulée, piétinée (surface à empreintes); *tracked surface (tracking surface)*

La surface foulée est une surface (paléosurface) sur laquelle l'animal (individu ayant laissé ses traces) interagit (Fornós et al. 2002), c'est-à-dire la surface exposée au moment de la formation des empreintes. Il est à noter, cependant, que la formation de n'importe quelle trace de vertébrés ou autres organismes vivants implique le déplacement de particules de sédiment dans le sens que l'état de la surface à traces ne correspond plus à son état avant la formation des empreintes (fig. 54).

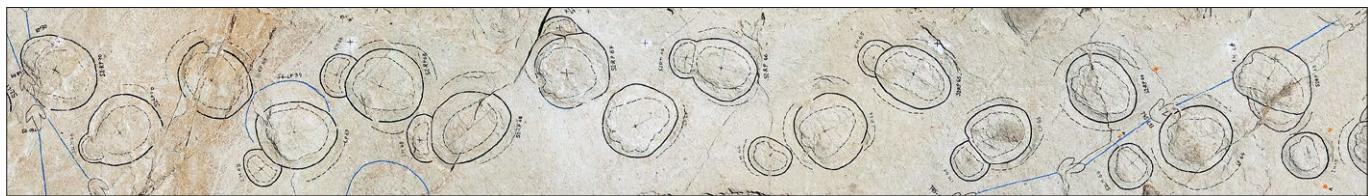


Fig. 64. Surimpression : séquence de piste présentant des variations de position des mains par rapport aux pieds. La main est parfois éloignée du pied, parfois surimprimée en partie par le pied ou encore complètement recouverte et invisible.

Surimpression; overprint / overprinting (overstep, overstepping)

Lorsqu'un animal quadrupède recouvre l'empreinte de sa/ses pattes avant avec la/les empreintes laissées par sa/ses pattes arrière, il crée une surimpression. Elle peut être partielle ou complète, camouflant ainsi partiellement ou complètement l'empreinte de la main (fig. 64).

Trace altérée, lessivée; weathered track (altered track, eroded track)

Ce terme fait référence aux empreintes qui ont subi des modifications liées au processus d'érosion (vent, pluie, marée, croissance de racines, karstification, circulation de fluides). Les processus d'altération peuvent intervenir à différentes périodes géologiques. Il est important de distinguer l'altération récente (due à une exposition naturelle du site à traces à l'air libre) de l'altération antérieure, et des processus taphonomiques ayant eu lieu entre le moment de la formation de la trace, son enfouissement et sa préservation.

Trace « élite »; elite track

Ce type de trace fait référence à une « vraie » empreinte bien préservée, avec impressions des doigts (coussinets des phalanges, phalanges), des griffes ou même de la peau. Elle révèle des informations sur l'anatomie du pied de l'individu ayant laissé son empreinte (Lockley & Hunt 1995; Lockley & Meyer 2000). Seules de « vraies » empreintes bien préservées ou des traces « élites » peuvent être utilisées à des fins ichnotaxinomiques.

Trace modifiée; modified track

Trace ayant subi des modifications physico-chimiques (altération, p. ex.) et/ou des influences biologiques après leur formation. La croissance de tapis microbiens, recouvrant toute la surface à empreintes ou que le fond de la trace, est un important facteur biologique de transformation des empreintes (Marty et al. 2009) (fig. 55 et 56). Les termes « faiblement », « moyennement » ou « fortement » peuvent être utilisés pour caractériser le degré de modification. Ce type d'empreintes diffère d'une « vraie empreinte » non modifiée dans le sens qu'il ne révèle plus les détails anatomiques du pied. De même, la différence avec les surempreintes réside dans le fait que la surface à empreintes n'est pas recouverte mais modifiée (fig. 54c).

Trace totale; overall track

Terme utilisé si les bords de l'empreinte ne sont pas verticaux et donc que l'intersection entre la trace et la surface à traces est plus grande que les dimensions du pied de l'individu qui les a laissées (vraie empreinte, fond de l'empreinte) (Brown 1999) (fig. 54).

« Vraie » empreinte; true track (surface print)

Une « vraie » empreinte représente une surface, le fond de l'empreinte, qui a été en contact direct avec le « pied » ou la « main » de l'individu l'ayant laissée. Des « vraies » empreintes peuvent aussi être observées en tant que sous-impressions. Si le pied pénètre profondément dans le substrat, la « vraie » empreinte peut correspondre à une surface couverte complexe reflétant la morphologie du pied et dont le moule naturel (ou artificiel) peut révéler de très fins détails anatomiques tels que les doigts ou les griffes en trois dimensions (Avanzini et al. 2011 ; Huerta et al. 2012) (fig. 54).

6.1.2 Nomenclature des empreintes et des pistes

Introduction

Afin d'organiser et de documenter les objets sur le terrain et pour faciliter leur distinction lors de l'analyse, une série de codes de nomenclature, servant de référence, ont été définis. L'objectif de cette démarche est de pouvoir désigner précisément chacun des ichnofossiles sans aucune ambiguïté. Chaque code peut apparaître plusieurs fois mais ils se différencient les uns des autres par des paramètres spécifiques (nom de site ou de couche, p. ex.) Les différents termes utilisés ont été listés et explicités afin de mettre sur pied une documentation ichnologique claire et précise au sein de la Paléontologie A16. Ces codes ont été appliqués de manière systématique, mais des différences sont cependant observées, en lien avec la chronologie, l'intervenant ou les erreurs potentielles. Une synthèse des différents termes employés – indiquant le terme référent pour chaque objet – a été dressée afin d'éliminer toute incertitude et de pouvoir se référer correctement à l'objet souhaité (fig. 65).

Dénomination et numérotation des empreintes et des pistes

Les empreintes et les pistes ont été numérotées par couche, indépendamment des secteurs de fouille. L'abréviation utilisée pour les pistes de sauropodes est S, et T pour celles des théropodes. Certaines pistes, constituées d'empreintes comportant trois doigts (tridactyles), mais pas clairement attribuables à des pistes de théropodes, ont été identifiées au moyen de l'abréviation TR, indiquant des pistes à empreintes tridactyles.

En rapport avec les pistes de sauropodes, les empreintes de pieds, correspondant aux pattes postérieures, sont abrégées au moyen de la lettre P (du latin pes) et celles des mains, se rapportant aux pattes antérieures, sont abrégées par la lettre M (du latin manus). Les pistes sont systématiquement numérotées en commençant par la paire d'empreintes (pied/main) gauches. Si celle-ci est absente, la première paire (pied/main) gauche portera le numéro 2.

Nomenclature ichnologique					
	Abréviaction	Correspondance	Autre(s) terme(s) utilisé(s)	Explication / remarque	Exemple
Pistes	L	<i>left</i>	gauche	membre gauche	L3, LP2, LM7
	R	<i>right</i>	droite	membre droit	R9, RM2, RP5
	M	<i>manus</i>	main	en principe uniquement utilisé pour des quadrupèdes	RM8
	P	<i>pes</i>	pied	en principe uniquement utilisé pour des quadrupèdes	RP4
	S	sauropode		Sauropoda (<i>Sauropodomorpha</i> , dénomination plus correcte, serait utilisé dans l'idéal mais Sauropoda existe déjà dans beaucoup de fichiers)	S4 RP2
	T	théropode	Theropoda, Theropoda indet.		T9 L4
	TR	tridactyle		trace tridactyle qui ne correspond sans doute pas à un théropode	TR5 R7
	S, T, TR	pistes sauropodées, théropodes et tridactyles		l'exemple indique comment les signes de ponctuation sont utilisés pour séparer les pistes et les empreintes	S1 LP1-LP5, LP8, RP10; S2 RP2, LP5
Empreintes	E	empreinte isolée	Ei, T (CRO), TR (CRO)	Ei est parfois utilisé comme abréviation pour parler d'une empreinte isolée dans un texte; se différencie d'une piste (T ou TR) parce qu'elle ne sera suivie que d'un chiffre et non d'une indication liée au pied, gauche ou droit (P et M)	E4, T2, TR1
	TE	trace énigmatique		structure sans doute liée à une activité animale mais qui n'est pas une trace de pied ou main de dinosaure	TE2
Détails anatomiques	Ph, ph, p	phalanges	P		BSY008-142 : T1 L1 - III3; s2 S1 RP1 - III
	C	<i>claw</i>	griffe		BSY008-142 : T1 L1 - CII; S1 RP1 - CI
	d	<i>digit</i>	doigt	les chiffres romains désignent automatiquement les doigts et les chiffres arabes qui les suivent indiquent le numéro de la phalange	Pour une empreinte isolée de tridactyle : BSY008-13 : E6 - dIIIph3 BSY008-234 : E19 - dRph1
Sur/sous - empreintes	OT	<i>overtrack</i>	Sur-E , surempreinte	indique une surempreinte ou la présence d'une surempreinte sur une couche sus-/sous-jacente	fig. 70
	UT	<i>undertrack</i>	Ss-E, sous-empreinte	indique une sous-empreinte ou la présence d'une sous-empreinte sur une couche sus-/sous-jacente	
	TT	<i>true track</i>	vraie empreinte	pour définir qu'une empreinte est une TT, il est nécessaire d'avoir fait l'étude de cette trace et d'être sûr qu'elle n'est pas une sur/sous-empreinte ; c'est donc une terminologie très peu utilisée jusqu'à présent	
	CE	contre-empreinte	aussi utilisé: contre-empreintes, contre-E; natural cast, track fill	le terme « contre-empreinte » est utilisé pour un prélèvement s'il est classé avec le code d'inventaire « f »; le numéro de couche du prélèvement doit alors être identique à celui de l'empreinte correspondante le terme « remplissage » peut être utilisé pour un prélèvement avec « ss » comme code d'inventaire; le numéro de couche est un numéro différent de l'empreinte à laquelle il correspond	

Fig. 65. Tableau synthétique des différents termes utilisés ou des termes correspondants, relatifs à chaque type d'objet.

Les lettres L (*left*) et R (*right*) sont utilisées pour indiquer respectivement les empreintes se rapportant aux membres de latéralité gauche ou droite. Par exemple, LP1 se réfère au premier pied gauche de la piste et RM5 à la cinquième empreinte de la main droite. Les pistes de dinosaures, bipèdes, sont désignées par les lettres L et R uniquement, suivies par le numéro de l'empreinte. Dans ces deux cas de figure, la numérotation se poursuit, abstraction faite de la présence ou de l'absence d'une empreinte (fig. 66 et 67a).

Certaines adaptations particulières ont été nécessaires en fonction des conditions de fouille, de contraintes morphologiques, ou d'impératifs liés aux planifications dépendant des collaborations avec la Section des constructions routières et les différentes entreprises actives dans la construction de l'autoroute. Les ajustements rendus nécessaires sont les suivants :

- numérotation lacunaire : si des conditions géologiques, stratégiques ou techniques rendaient imperceptible une partie de l'enregistrement de la piste, le même numéro de piste a été attribué pour la suite des empreintes visibles, avec une numérotation continue, pour autant que la corrélation claire entre les deux segments de piste ainsi qu'une estimation du nombre d'empreintes manquantes soient possibles (fig. 67a);

- numérotation négative : si de nouvelles empreintes étaient découvertes en amont d'une piste déjà constituée et numérotée, elles ont été identifiées au moyen de chiffres négatifs (fig. 67b);
- numérotation bis : si une piste nouvellement découverte s'avérait correspondre clairement soit au début, soit à la suite d'une piste documentée lors des années précédentes (qu'elle soit encore visible ou non), le même numéro de piste, suivi du suffixe *bis*, lui a été attribué (fig. 67c).

Les empreintes qui ne peuvent être attribuées à une piste avec certitude sont désignées par la lettre E, abréviation d'empreintes isolées. Elles peuvent être de nature différente (individus différents, sédimentologie, altération, etc.) mais leur dénomination sur le terrain ne permet pas de les différencier les unes des autres ou pas de manière systématique :

- empreinte isolée s'apparentant à une empreinte de dinosaure de manière assez explicite mais n'appartenant pas à une piste, ou pas distinctement;
- empreinte isolée ne correspondant pas à un dinosaure mais à un autre individu identifié ou supposé;
- empreinte non identifiée;
- empreinte liée à un phénomène sédimentologique identifié ou supposé;
- toute autre empreinte ou structure non identifiée.

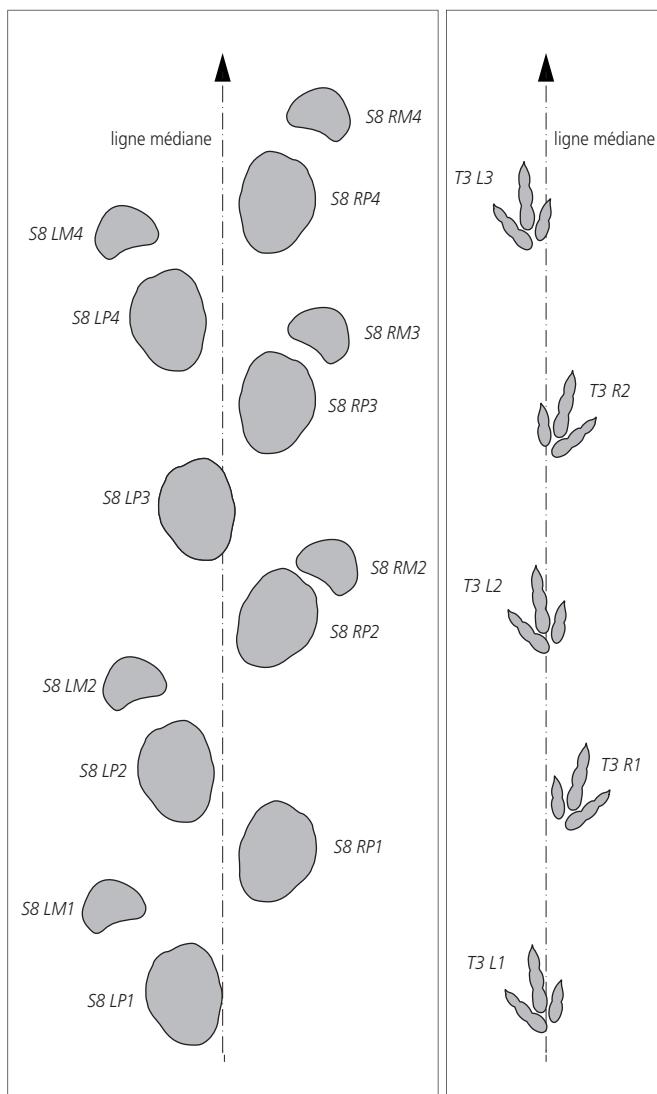


Fig. 66. Représentation schématique des pistes de sauroptodes et de théropodes, permettant d'en expliquer la nomenclature et la numérotation (fig. 65).

L'abréviation TE a aussi parfois été utilisée (principalement sur le site de Béchat Bovais) pour indiquer la présence de « traces énigmatiques ». Elles peuvent être liées à une piste – à savoir l'interaction entre l'animal et le sédiment – ou complètement indépendante. Cette désignation n'a cependant pas été utilisée systématiquement.

Un numéro de piste est attribué, selon la définition, à une succession minimale de trois empreintes ou paires pied/main qui peuvent être reportées à un individu unique. Dans la documentation de la Paléontologie A16, une quantité considérable de numéros de pistes de théropodes se réfèrent cependant à des suites d'occurrences de deux empreintes et pas plus. Ces pistes présentaient un alignement significatif et une préservation des empreintes permettant de les regrouper de cette manière. Cet état de fait sera pris en considération lors de leur description et de leur étude.

Dénomination et numérotation des détails anatomiques (doigts, phalanges, griffes)

Des standards basés sur les principes d'anatomie fondamentale ont été appliqués, sur le terrain, pour décrire de manière homogène les empreintes.

Pistes quadrupèdes: les sauroptodes

Les extrémités des pattes arrières (pied) des sauroptodes, larges, possèdent trois griffes chez la plupart des espèces. Les extrémités des membres antérieurs (main), possèdent cinq doigts disposés de manière très différente de ceux des pieds, fait assez rare dans le règne animal. Au lieu d'être évasés de manière à avoir un appui large et réparti, les os de la main étaient arrangés en colonnes verticales (digitigrade), avec des phalanges extrêmement diminuées (fig. 68a).

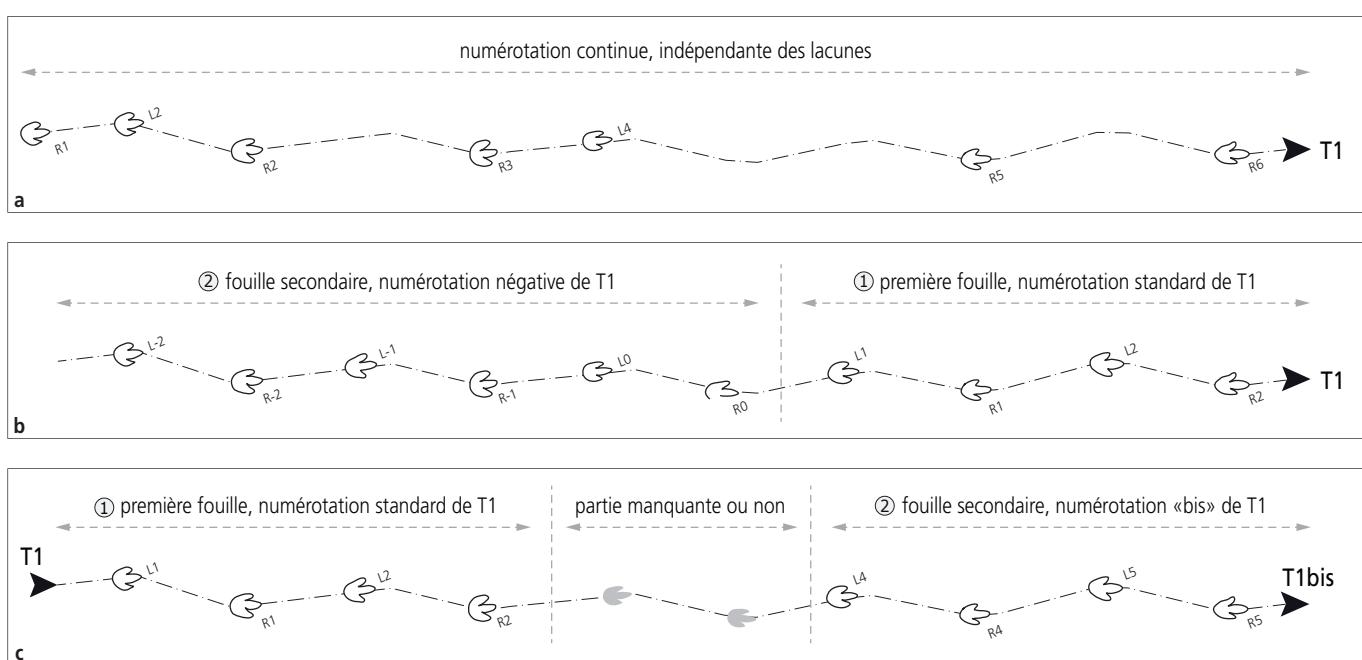


Fig. 67. Représentation schématique des cas particuliers de numérotation: a) numérotation lacunaire; b) numérotation négative; c) numérotation bis.

La main de sauropode comporte cinq métacarpes dressés verticalement en colonnade, arrangés en forme de U, tels des piliers, leur permettant de supporter un poids conséquent. La seule griffe visible sur la main, celle du pouce, est nettement distincte et large chez la plupart des sauropodes. Son utilité est encore inconnue à ce jour. Elle était très grande (mais également longue et latéralement plate) chez les Diplodocidae, réduite chez les Brachiosauridae et probablement absente chez les Titanosauridae.

Elle se différencie de celles des pieds (doigts I-III) parce qu'elle est plus large, moins compressée dans son extrémité proximale et moins fortement incurvée en vue latérale (Weishampel et al. 2004).

Le pied a conservé cinq doigts, dont les trois les plus internes (dl-dlll) portent des griffes. Les métatarses sont robustes et, pour tous les sauropodes, sauf certaines formes basales, ils présentent une morphologie qui diverge vers l'extérieur à leurs extrémités distales (Wilson & Sereno 1998). Les métatarses forment un pied semi-digitigrade. Le doigt I est le plus court et le plus robuste, son extrémité proximale est en forme de D. Des structures indurées et incurvées sont présentes sur les doigts I-III (fig. 68a).

Sur les empreintes de pieds, les marques des cinq doigts sont numérotées du plus médial au plus latéral. Les pieds présentaient vraisemblablement des coussinets arrondis cornés, comme ceux des éléphants actuels. Sur les fouilles de l'A16, des détails anatomiques n'ont été que très rarement découverts sur les empreintes de mains. Seules des empreintes des doigts I et V, des enfoncements en forme de sillon à l'avant (fusion dlI-dlV), et très rarement des marques de griffes sur le dl, ont été parfois observés. Les pieds ont plus fréquemment présenté des traces de doigts (I-III généralement) et plus rarement de griffes (fig. 68b).

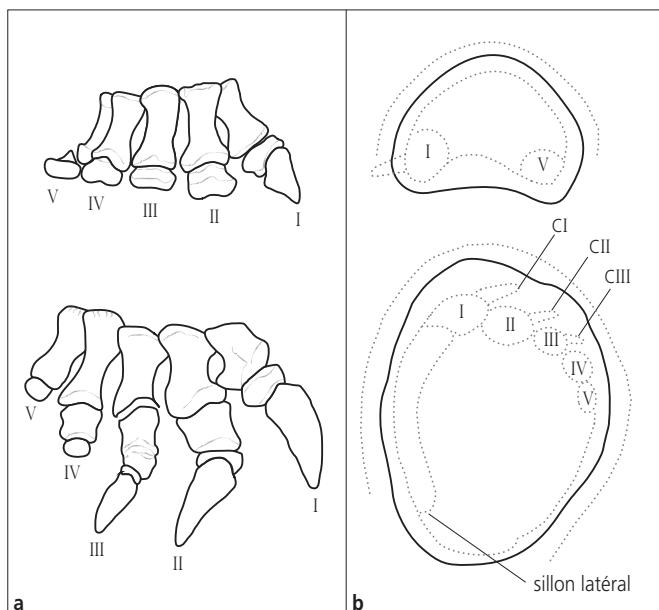


Fig. 68. a) squelette de la main et du pied d'*Apatosaurus excelsus* (modifié d'après Farlow et al. 1989, fig. 42.8); b) terminologie utilisée pour la description des empreintes de sauropodes (modifié d'après Marty 2008, fig. 2.10) (fig. 65).

Pistes bipèdes: empreintes tridactyles

La plupart des empreintes tridactyles découvertes proviennent des théropodes, animaux bipèdes et surtout carnivores. D'autres empreintes tridactyles, généralement plus larges et plus grandes (TR), n'ont pas été attribuées à des théropodes. Il est probable qu'elles coïncident plutôt à des ornithopodes (*Camptosaurus*, p. ex.), ce que leur analyse permettra de préciser (Marty et al. 2017; Razzolini et al. 2017; Castanera, à paraître).

Le nom théropode a été défini par Marsh (1881) pour englober tous les dinosaures carnivores connus du Trias, du Jurassique et du Crétacé. Les théropodes ont été distingués en deux subdivisions principales (Huene 1914a, 1920): *Coelurosauria* et *Carnosauria*. Ces deux groupes ont ensuite été utilisés plus conventionnellement par les auteurs pour inclure respectivement les « petits théropodes » et les « grands théropodes » (Senter 2007). Leurs membres postérieurs assuraient le soutien du corps et la locomotion, et se terminaient par trois doigts portant chacun une griffe. Ils correspondent aux doigts II, III et IV, car les doigts I et V étaient atrophiés et ne touchaient pas le sol durant la marche (fig. 69a) (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Theropoda>). Les empreintes de tridactyles, retrouvées sur les fouilles de l'A16, présentent régulièrement des marques de griffes ou de phalanges (fig. 69b).

Surempreintes et sous-empreintes

Lors des fouilles, les surempreintes et les sous-empreintes ont généralement été numérotées en tant qu'empreintes ou pistes; une indication peut cependant apparaître dans la documentation spécifiant si elles correspondaient potentiellement à l'une ou l'autre empreinte d'une couche sus-jacente ou sous-jacente. Aucun nom spécifique aux surempreintes ou sous-empreintes n'a été défini pour le travail de terrain. Par la suite, lors du traitement des données, il s'est avéré nécessaire de désigner par une nomenclature adéquate ce type d'empreinte. Chaque cas probable a été pris en compte (fig. 70).

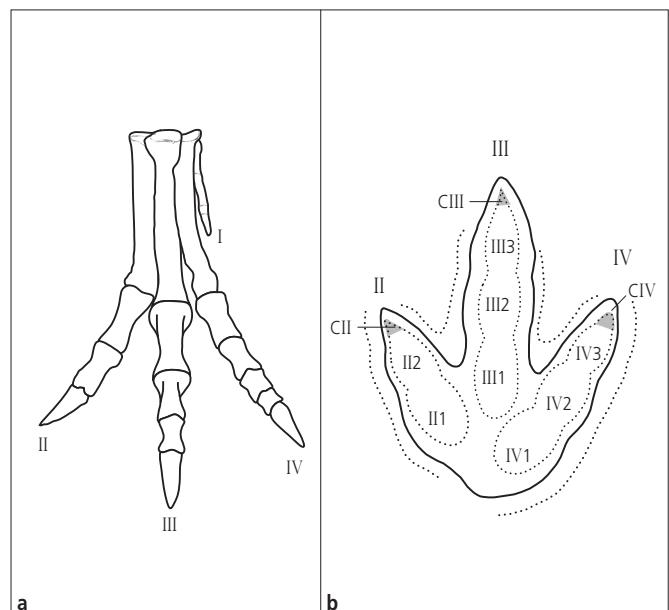


Fig. 69. a) squelette du pied de *Neovenator salerii* (modifié d'après Brusatte 2008, fig. 25); b) terminologie utilisée pour la description des empreintes tridactyles (fig. 65).

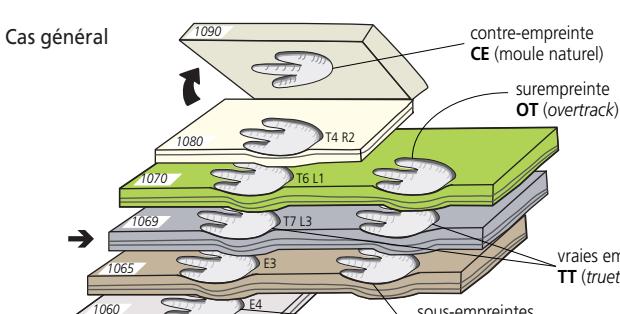
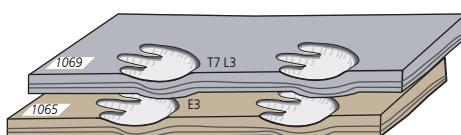
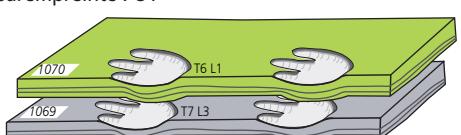
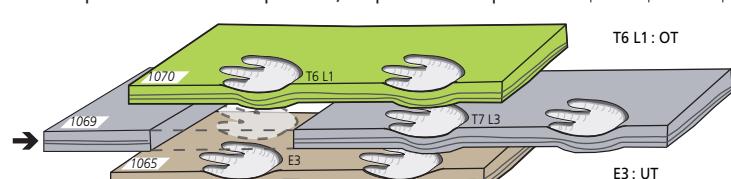
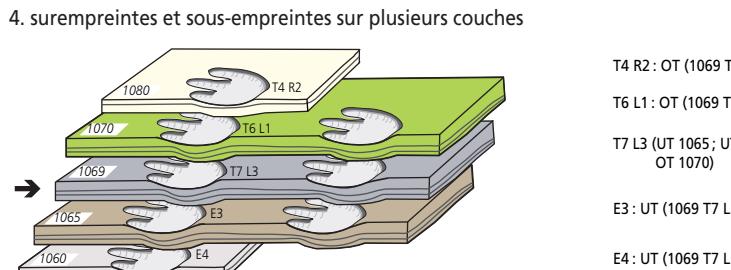
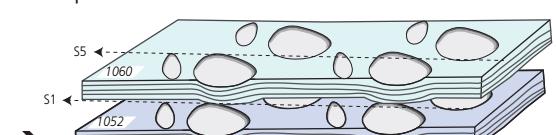
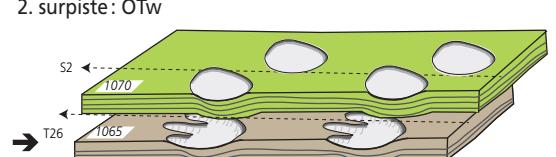
Nomenclature des surempreintes et des sous-empreintes		
Cas général  <p>Remarque : sous-piste : UTw (<i>undertrackway</i>) / surpiste : OTw (<i>overtrackway</i>)</p>	Signes et symbole <ul style="list-style-type: none"> « : » signe de définition : le deux-points indique une équivalence, il signifie «est un / une» « () » signe de relation : les éléments entre parenthèses se rapportent à une autre couche sus- / sous-jacente ; le numéro correspondant à la vraie empreinte ou piste est mentionné dans la parenthèse uniquement ➔ symbolique indiquant la couche sur laquelle la vraie empreinte a été laissée 	
1. sous-empreinte : UT 	Nomenclature T7 L3 (UT 1065) E3 : UT (1069 T7 L3)	Explication T7 L3 a une sous-empreinte qui se trouve sur la couche 1065 E3 est une sous-empreinte de T7 L3 qui se trouve sur la couche 1069
2. surempreinte : OT 	T6 L1 : OT (1069 T7 L3) T7 L3 (OT 1070)	T6 L1 est une surempreinte de T7 L3 qui se trouve sur la couche 1069 T7 L3 a une surempreinte qui se trouve sur la couche 1070
3. surempreintes et sous-empreintes, empreinte manquante 	T6 L1 : OT E3 : UT	cas possible que si les empreintes des couches 1065 et 1070 peuvent être reliées à une piste visible sur la couche 1069 T6 L1 est une surempreinte E3 est une sous-empreinte
4. surempreintes et sous-empreintes sur plusieurs couches 	T4 R2 : OT (1069 T7 L3) T6 L1 : OT (1069 T7 L3) T7 L3 (UT 1065; UT 1060; OT 1070) E3 : UT (1069 T7 L3) E4 : UT (1069 T7 L3)	T4 R2 est une surempreinte de T7 L3 qui se trouve sur la couche 1069 T6 L1 est une surempreinte de T7 L3 qui se trouve sur la couche 1069 T7 L3 a une sous-empreinte qui se trouve sur la couche 1065, une sous-empreinte sur la couche 1060 et une surempreinte sur la couche 1070 E3 est une sous-empreinte de T7 L3 qui se trouve sur la couche 1069 E4 est une sous-empreinte de T7 L3 qui se trouve sur la couche 1069
Pistes 1. sous-piste : UTw 	S5 (UTw 1052) S1 : UTw (1060 S5)	S5 a une piste de sous-empreintes sur la couche 1052 S1 est une piste de sous-empreintes, elle correspond à la piste de «vraies» empreintes S5 de la couche 1060
2. surpiste : OTw 	S2 : OTw (1065 T26) T26 (OTw 1070)	S2 est une piste de surempreintes de T26 qui se trouve sur la couche 1065. Ce cas est exceptionnel. Une des empreintes de S2 a été fouillée et il a été constaté qu'il s'agissait en réalité de vraies empreintes de tridactyle formées sur la couche 1065. T26 a une piste de surempreintes sur la couche 1070. Elles se présentent sous l'aspect d'empreintes de sauropode, elles avaient donc été numérotées en tant que telles avant que la couche 1065 ne soit atteinte par décapage.

Fig. 70. Standards de nomenclature définis pour la description des surempreintes et des sous-empreintes.

6.1.3 Description scientifique des pistes

Introduction

Les traces de dinosaures résultent de l'interaction complexe entre le mode de déplacement d'un animal, l'anatomie de ses pieds et de ses mains, mais aussi les propriétés du substrat et les processus taphonomiques (chap. 6.1.1). Conjointement aux mesures des paramètres (chap. 6.1.4), il était donc important de réaliser des documents présentant les pistes et chacune des empreintes en décrivant leur rapport avec le milieu dans lequel elles ont été enregistrées. Ces fiches sont indispensables pour assurer une étude complète, dans un contexte où l'affleurement est amené à disparaître. Elles permettent de mettre en évidence des caractéristiques importantes de la piste, observées *in situ*, impossibles à symboliser sur un dessin ou difficiles à observer par la suite sur une photographie. Les buts premiers sont d'indiquer la présence ou l'absence d'une empreinte au sein d'une piste, et de réaliser un croquis indicatif de chaque trace. Les observations

permettent aussi d'évaluer la préservation des empreintes en termes de qualité selon des critères établis et, éventuellement, de donner des indices interprétatifs quant à l'identification, à l'ordre de passage en cas de croisement de plusieurs individus, ou au comportement des dinosaures. De plus, ces descriptions mettent en exergue les interactions de l'empreinte avec le substrat et ses singularités sédimentologiques (polygones de dessiccation, rides de vagues, etc.), les éléments liés à la géologie (failles, érosion, etc.) et les autres éventuels fossiles ou ichnofossiles. Finalement, elles visent à décrire le maximum d'informations observées sur le terrain, difficiles à retracer à partir de la documentation lorsque l'affleurement a disparu.

Une série de critères descriptifs a été établie afin d'assurer une bonne cohérence entre les documents réalisés par différents auteurs. Ces critères méritent d'être cités et brièvement explicités afin d'assurer une compréhension adéquate. Ils sont présentés selon les étapes de remplissage des standards mis en place (fig. 71).

Fig. 71. Exemple de description scientifique d'une piste sur le terrain.

6.1.3.1 Description générale des pistes (fig. 72)

- Allure, profil général de la piste;
- particularités;
- changements de profondeur des empreintes, direction, position des pieds et des mains;
- évaluation de la préservation et/ou de la profondeur des empreintes (bien marquées, mal marquées);
- croisements avec d'autres individus;
- fréquence indicative des mains ou des pieds (*pes-dominated, manus-dominated*);
- largeur indicative de la piste (large, étroite), changements au sein de la piste.

6.1.3.2 Croquis (fig. 72)

- Représentation des empreintes par des lignes pointillées ou continues, pour indiquer la forme générale de l'empreinte et mettre en évidence des éléments importants (bourrelets, détails anatomiques, etc.);
- symbolisation des failles (lignes continues, intérieur parfois grisé), des fractures, des décalages verticaux ou horizontaux (indication d'une valeur en cm) liés à la piste ou à une empreinte;
- indication d'une absence de la couche ou d'une partie de la couche (éventuelle sous-empreinte sur la couche inférieure) et/ou d'un reste de la couche supérieure soudée (éventuelle surempreinte sur la couche supérieure); placage ;
- notification des croisements avec d'autres pistes par des flèches et le numéro des pistes concernées;
- annotation d'éventuels éléments sédimentologiques interférant avec la trace (terriers, polygones de dessiccation, rides de vagues, etc.);
- mise en évidence des détails anatomiques;
- annotation des limites de couches ou du chantier relatives à la piste (ligne traits-points).

6.1.3.3 Description détaillée des empreintes (fig. 72)

- Évaluation de la perceptibilité et/ou de la conservation de l'empreinte (à peine visible, visible, bien visible, en partie/partiellement visible ; p. ex. partie avant gauche visible mais pas le reste);
- préservation : bien définie (forme, intérieur et pourtour clairs), mal définie (empreinte difficile à délimiter de façon sûre);
- indication sur la profondeur de l'empreinte (valeur indicative et variable selon le type de trace) : peu profonde (<1 cm), moyennement profonde (~1-3 cm), bien profonde (>2-3 cm);
- indication sur la qualité de l'empreinte;
- présence ou absence d'un bourrelet, description de ses caractéristiques (large ou étroit, bien ou mal visible), position (à l'avant, côté droit, etc.), interférence avec des fractures ou d'autres éléments;
- explication des interférences avec d'autres traces ou pistes, chronologie de croisement, détails relatifs à la superposition;
- évaluation de la trace par rapport au reste de la piste;
- orientation, disposition de la trace;
- mise en évidence du meilleur pied, de la meilleure main;
- description de détails particuliers :
 - trace visible (en partie) sur une couche inférieure ou supérieure;
 - trace incertaine, particulière ou très peu marquée;
 - interférence avec l'une ou l'autre empreinte de la même piste (main écrase le pied: LM2 écrase LP2);
 - interférence avec des failles, des fractures, des terriers ou des polygones de dessiccation, et conséquences;
 - restes de la couche supérieure soudés, restes de placage ;
 - particularités sédimentologiques (comment était le sédiment au moment du passage ? que s'est-il passé ?);
 - interprétations potentielles concernant une empreinte ou une piste;
 - explication de la raison d'empreintes manquantes (fin de couche, faille, etc.).

Fig. 72. Prises de vue des différents cas décrits: a) portion de piste dont les variations de profondeur et de taille/largeur des bourrelets sont importantes; b) moitié supérieure d'une empreinte absente, puisque la couche est manquante; c) interprétation du croisement de plusieurs pistes.

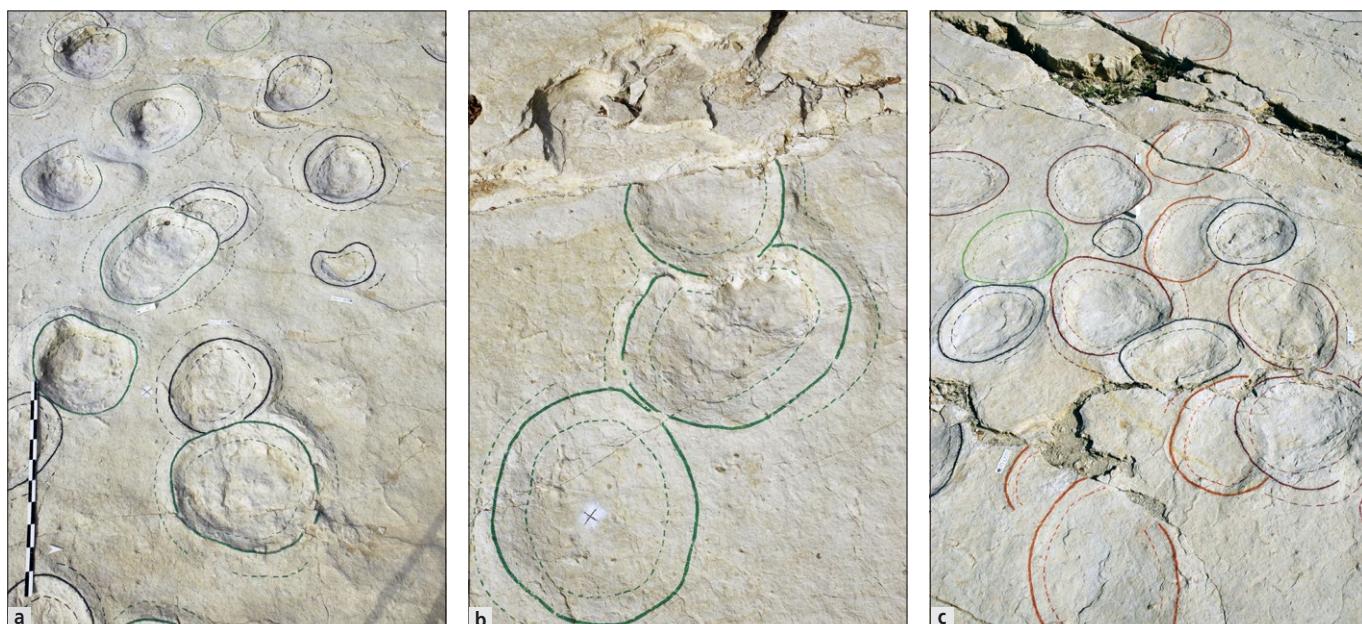




Fig. 72 (suite). Prises de vue des différents cas décrits :
 d) piste entrecoupée par plusieurs fractures interférent avec les empreintes, limite d'observation visible à gauche et à droite de l'image;
 e) piste dont les empreintes sont accidentées de manière significative par une faille;
 f) faille coupant l'empreinte et décalant verticalement la partie inférieure et supérieure de plusieurs centimètres;
 g) et h) empreintes aussi visibles sur la couche inférieure, la couche portant la trace étant en partie absente;
 i) et j) exemples d'interférence des polygones de dessiccation avec les empreintes;
 k) et l) terriers visibles à l'intérieur de l'empreinte;
 m) la couche supérieure soudée est observable à l'intérieur du pied (remplissage);
 n) exemple de superposition des empreintes (pied/main et pied/pied) le long d'une même piste (en vert).

6.1.4 Paramètres de pistes: mesures de terrain

Sur les chantiers de la Transjurane, les sites paléontologiques étaient éphémères, puisque voués à être détruits ou recouverts par l'autoroute. De plus, le travail de fouille était en soi destructif : les couches de laminites étant empilées les unes sur les autres, la destruction d'une couche était inévitable pour permettre l'accès aux fossiles des strates inférieures. Pour ces raisons, la préservation d'un maximum de données relatives aux ichnofossiles s'est avérée indispensable. Ainsi, en plus d'être dessinées et photographiées, les pistes et empreintes de dinosaures ont été mesurées de façon méthodique.

Les mesures systématiques réalisées sur le terrain sont une source d'informations intéressantes à plusieurs niveaux. Une partie des données sont utiles pour fournir des indications générales sur les dinosaures, leur taille, par exemple, ou leur vitesse de déplacement. D'autres mesures permettront, dans certains cas, d'affiner la taxinomie des individus. Dans ce but, et afin de rendre homogène la collecte de données, une première version de fichiers à l'usage du terrain a été réalisée (fig. 73).

Outre le fait que la nomenclature des fichiers papier était rédigée en anglais, ceux-ci diffèrent des fichiers postérieurs dans la façon de mesurer la largeur de la piste. Deux paramètres étaient alors mesurés sur le terrain pour les pieds : la largeur extérieure, *trackway width out* et la largeur intérieure, *trackway width in*, définies au moyen de la ligne médiane (fig. 74).

Après quelques essais d'utilisation sur le terrain et l'échange avec plusieurs scientifiques internationaux, la manière de mesurer la largeur des pistes a été modifiée. L'utilisation de la ligne médiane, relativement subjective puisque construite par la recherche approximative du centre de symétrie de la piste, a été abandonnée au profit d'une nouvelle méthode de mesure

SCR-002														
Trackway No. 55 / 1000			Level 1000			Name/Date DM/CL 13.11.02			Direction of propagation					
PES	Length (cm)	Width (cm)	Max. Depth*	Pes	Rotation (degree)	Trackway width out	Trackway width in	Manus	Length (cm)	Width (cm)	Max. Depth*	Manus	Rotation (degree)	manus/dilat.
LP1	3.3	2.8	0.5	165	6.8	0	0	LM1	pas mesuré					1.5
RP1	3.5	2.7	0.5	161	5.8	0	0	RM1	pas mesuré					1.5
LP2	3.5	2.4	0.5	150	5.8	0	0	LM2	11	19	1	115	8	4.1
RP2	3.8	2.6	0.5	151	5.4	-3	0	RM2	pas mesuré					4.1
LP3	3.7	3.0	4	24	6.4	0	0	LM3	10	22	1	110	12	2.2
RP3	3.7	2.9	2	156	6.0	0	0	RM3	pas mesuré					2.2
LP4	3.7	2.4	2	34	6.6	0	0	LM4	11	21	1	115	9	2.0
RP4	3.8	2.7	3	34	6.0	0	0	RM4	11	21	4	3.8	2.0	2.0
LP5	3.6	2.6	1	34	6.2	0	0	LM5	10	22	3	104	10	1.0
RP5	3.8	2.7	3	0	6.4	0	0	RM5	12	23	1	115	3.8	3.8
LP6	3.8	2.6	2	160	5.4	-4	0	LM6	9	23	2	107	7	1.0
RP6	3.8	2.6	4	153	6.2	0	0	RM6						
LP7								LM7						
RP7								RM7						
LP8								LM8						
RP8								RM8						
LP9								LM9						
RP9								RM9						
LP10								LM10						
RP10								RM10						
LP11								LM11						
RP11								RM11						
LP12								LM12						
RP12								RM12						
LP13								LM13						
RP13								RM13						
LP14								LM14						
RP14								RM14						
MEAN								MEAN						

*Distance between highest point of the rim and the deepest part of the imprint (to be indicated on the map)
mesures/pistes.xls

Fig. 73. Première version des fichiers pour les mesures de terrain.

(Largeur de piste, voir ci-après). Cette fois-ci, deux types de documents ont été élaborés, en français, et d'utilisation plus pratique sur le terrain : un pour les traces de sauroptères, quadrupèdes, et un autre pour celles des théropodes, bipèdes (fig. 75).

En même temps que la réalisation des fichiers, et afin de faciliter le travail de documentation, des standards de numérotation d'empreintes et de pistes ont été définis (chap. 6.1.2).

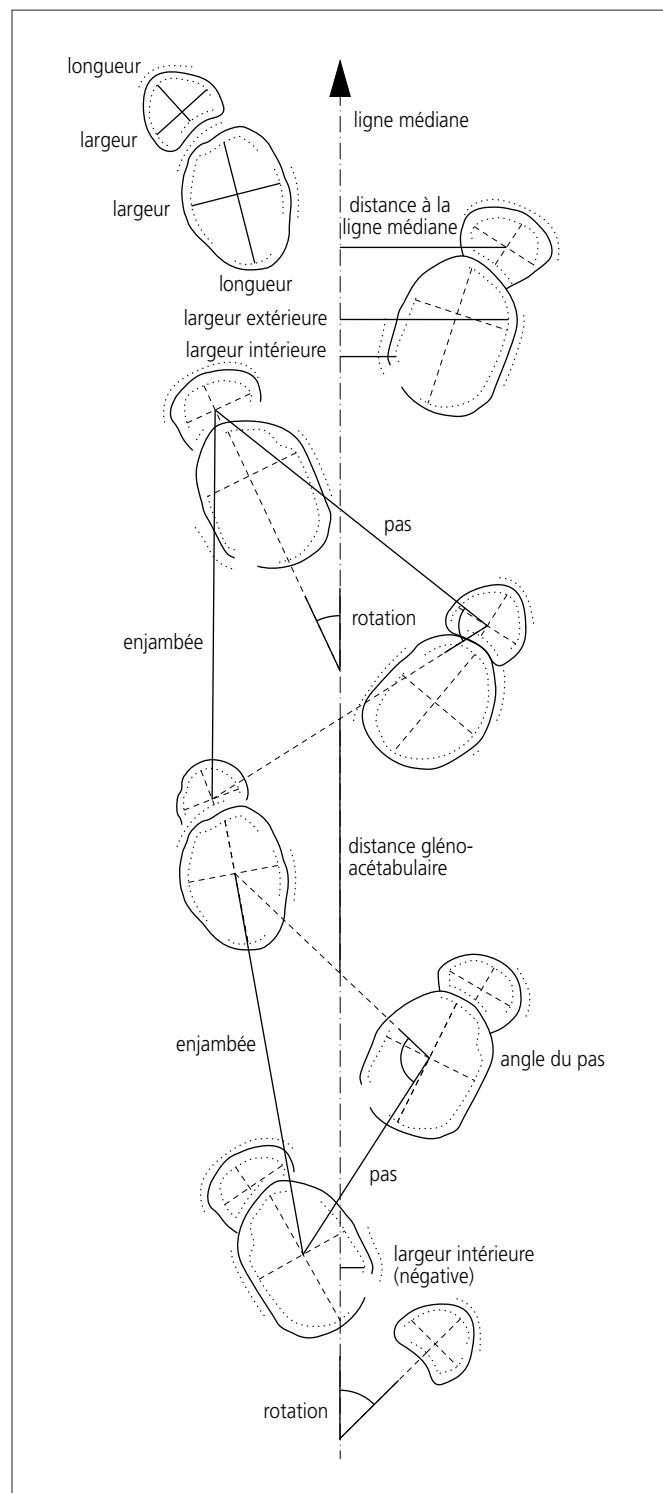


Fig. 74. Représentation d'une partie des paramètres mesurés. L'ancienne méthode de mesure de la rotation est indiquée ici; elle ne sera plus mesurée de cette manière par la suite.

Fig. 75. Version finale des fichiers de mesures:

a) **mesures des pistes de sauropodes;**

b) **mesures des pistes de théropodes.**

Site	Année	Sct	Cou	Nom/Date	Pages totales														
Piste	Observations particulières					Dir. ↑ N													
S	Empreintes				Pas				Distance génacétabulaire à l'E droite	Correspondance à l'E droite									
	Train arrière		Train avant		Train arrière		Train avant												
gauche droite		gauche droite		gauche droite		gauche droite		gauche droite											
No. empreinte	longueur	largeur	profondeur	rotation	longueur	largeur	profondeur	rotation	enjambée	facteur	largeur	pas	angle	enjambée	facteur	largeur	pas	angle	
LP1									cm	cm	cm	degré	cm			cm	cm	cm	degré
RP1																			
LM1																			
RM1																			
LP2																			
RP2																			
LM2																			
RM2																			
LP3																			
RP3																			
LM3																			
RM3																			
LP4																			
RP4																			
LM4																			
RM4																			
LPS																			
RP5																			
LM5																			
RM5																			
LP6																			
RP6																			
LM6																			
RM6																			

Site	Année	Sct	Cou	Nom/Date	Pages totales													
Piste	Observations particulières					Dir. ↑ N												
T	doigts				pas				Correspondance à l'E droite									
	Empreinte		II III IV II-III III-IV		gauche	droite	gauche	droite										
longueur	largeur	profondeur	longueur de la griffe	longueur	largeur	longueur	largeur	divergence	divergence	rotation	rotation	enjambée	facteur	largeur	pas	angle du pas		
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	degré	degré	degré	degré	cm	degré	cm	cm	degré		
LP1																		
RP1																		
LP2																		
RP2																		
LP3																		
RP3																		
LP4																		
RP4																		
LP5																		
RP5																		
LP6																		
RP6																		
LP7																		
RP7																		
LP8																		
RP8																		
LP9																		
RP9																		

Fig. 75. Version finale des fichiers de mesures de:

- a) mesures des pistes de sauropodes;
- b) mesures des pistes de théropodes.

Sur les fiches à l'usage du terrain sont notés le code du site (CHE-CRO, CTD-TCH, etc.), l'année en cours, le numéro de secteur ainsi que celui de la couche sur laquelle les empreintes et les pistes sont étudiées. Les initiales des intervenants et la date de prise de mesures sont également mentionnées, de même que l'orientation moyenne de la piste.

Un champ est réservé aux **observations particulières**, codifiées selon une nomenclature précise (chap. 6.1.3). Sont notifiées des informations sur l'état de conservation de la piste (entre bien et mal définie), l'état de conservation de la couche (fracturée,

présence de failles, surface lessivée), les virages éventuels, etc. La présence de détails anatomiques est également spécifiée, de même que la typologie des pistes de sauropodes s'il y a lieu (Typologie des pistes de sauropodes, voir ci-dessous).

Après une brève description de la piste, un nombre important de paramètres sont mesurés. Chaque fois qu'un paramètre ne peut pas être mesuré, une croix est inscrite dans la case correspondante. Lorsqu'une empreinte est absente, soit qu'elle n'a pas été imprimée ou qu'elle a été entièrement érodée, la ligne entière est biffée. Les valeurs considérées comme non fiables

(empreinte mal préservée, présence d'une faille, etc.) sont mises entre parenthèses : elles seront retranscrites dans les fichiers informatisés à titre indicatif, mais ne seront pas utilisées dans les différents calculs et moyennes. À noter que tous les cas particuliers (empreintes non imprimées, surimprimées, présence de failles, etc.) sont spécifiés dans les descriptions scientifiques afin d'expliquer les valeurs biaisées ou considérées comme non pertinentes (chap. 6.1.3).

Il existe diverses manières de mesurer les paramètres de pistes des traces de dinosaures, qui varient le plus souvent en fonction des auteurs. Dans la littérature, seuls les paramètres comme le pas ou l'enjambée sont toujours mesurés de la même manière.

Malgré l'utilisation d'une méthode clairement standardisée de collecte de données (chap. 6.1.2), il existe une part d'incertitude dans le résultat des mesures des différents paramètres de terrain. En effet, les paramètres dépendent en partie de la documentation des empreintes sur le terrain. Par exemple, la délimitation de la ligne interne des empreintes, correspondant à la partie du sédiment qui a été en contact direct avec le pied de l'animal, n'est pas toujours nette par rapport au bourrelet de déplacement et est parfois sujette à interprétation.

De plus, si le séquençage des empreintes chez les bipèdes peut être qualifié de « logique », puisqu'il correspond à une alternance régulière des pieds gauches et des pieds droits, il est plus difficile de suivre l'alternance des empreintes chez les quadrupèdes.

La définition de pistes de dinosaures à partir des empreintes est une étape importante, les pistes autorisant certains calculs et interprétations spécifiques. Une piste est définie comme étant une succession d'empreintes laissées par un animal en mouvement. Au sens technique du terme, elle est en général considérée comme telle lors de la présence d'une série de trois séquences pied-main chez les quadrupèdes, et de trois empreintes postérieures chez les bipèdes (Marty 2008). Cependant, un certain nombre de pistes ne comportant qu'une succession de deux empreintes ont été documentées sur les chantiers de la Paléontologie A16, la configuration très similaire des empreintes ayant permis de les attribuer au même animal. Les différents paramètres sont alors à utiliser à titre indicatif.

Des divers paramètres mesurés, la longueur de l'empreinte postérieure permettra d'estimer la taille des dinosaures, au moyen de formules insérées dans les fichiers informatisés (chap. 6.1.5). Ainsi, les dinosaures des sites de la Paléontologie A16 sont classés en plusieurs catégories de taille en fonction de la longueur moyenne de leurs pieds, allant de « très petit » à « grand » pour les quadrupèdes, et à « très grand » pour les bipèdes (fig. 76).

La mesure de la distance entre deux empreintes successives du même pied (l'enjambée) donnera, elle, des indications sur la vitesse de déplacement (chap. 6.1.6) ; ces données sont évidemment à mettre en lien avec la taille de l'animal. À taille d'empreintes égale, plus la distance entre chaque empreinte est grande, plus la vitesse de déplacement est élevée.

Empreintes	Size class	Taille	Longueur des pieds (PL) (cm)
dinosaures quadrupèdes (sauroptères)	<i>tiny</i>	très petit	PL < 25
	<i>small</i>	petit	25 ≤ PL < 50
	<i>medium sized</i>	moyen	50 ≤ PL < 75
	<i>large</i>	grand	PL > 75
dinosaures bipèdes (théropodes, ornithischiens)	<i>minute</i>	très petit	PL < 10
	<i>small</i>	petit	10 ≤ PL < 20
	<i>medium sized</i>	moyen	20 ≤ PL < 30
	<i>large</i>	grand	30 ≤ PL < 50
	<i>huge</i>	très grand	PL > 50

Fig. 76. Classification des dinosaures en fonction de la taille moyenne de leurs pieds. Seuls les ordres précisés entre parenthèses sont concernés par cette classification.

Un autre paramètre, défini par la distance séparant les pieds droits des pieds gauches, renseigne sur la largeur du tronc de l'animal. De plus, la rotation des pieds par rapport à la ligne médiane indique si l'animal marchait avec les pieds tournés vers l'extérieur, «en canard», ou plutôt vers l'intérieur. Ces indications, en plus de la forme des empreintes, peuvent aider à définir le type d'animal qui a laissé les traces observées.

Enfin, pour les quadrupèdes, la position des empreintes avant et arrière peut donner des indications sur la longueur du corps de l'animal (distance gléno-acétabulaire). Pour cela, il est indispensable de pouvoir définir à quel endroit et dans quel ordre l'animal pose ses pattes avant et arrière.

6.1.4.1 Empreintes de sauroptères

Longueur et largeur de l'empreinte

La longueur et la largeur de l'empreinte sont mesurées sans tenir compte du bourrelet de déplacement. Les mesures sont définies par la ligne interne de l'empreinte, ce qui correspond approximativement à la dimension de l'empreinte au sens strict, c'est-à-dire à l'impression du pied ou de la main dans le terrain. Pour des raisons pratiques, le terme de main est utilisé pour définir l'autopode du membre antérieur des sauroptères, même si celui-ci n'est pas totalement correct du point de vue anatomique.

La **longueur** du pied ou de la main correspond à l'axe qui coupe la ligne interne de l'empreinte en deux parties approximativement égales dans le sens de la hauteur, les griffes n'étant pas prises en compte.

La **largeur** est mesurée perpendiculairement à l'axe de la longueur, à l'endroit où l'empreinte est la plus large.

Pour les pieds de sauroptères, la longueur est en principe plus grande que la largeur. En revanche, la longueur de la main est en général plus petite que la largeur (fig. 77).

Pour les empreintes laissées par les pattes antérieures, c'est la largeur qui en représente le mieux la taille réelle, puisque celle-ci varie moins que la longueur pouvant être très affectée par la cinématique de l'animal. Il n'est en effet pas rare que les empreintes de mains soient en partie surimprimées par les empreintes de pieds, rendant la mesure de leur longueur difficile.

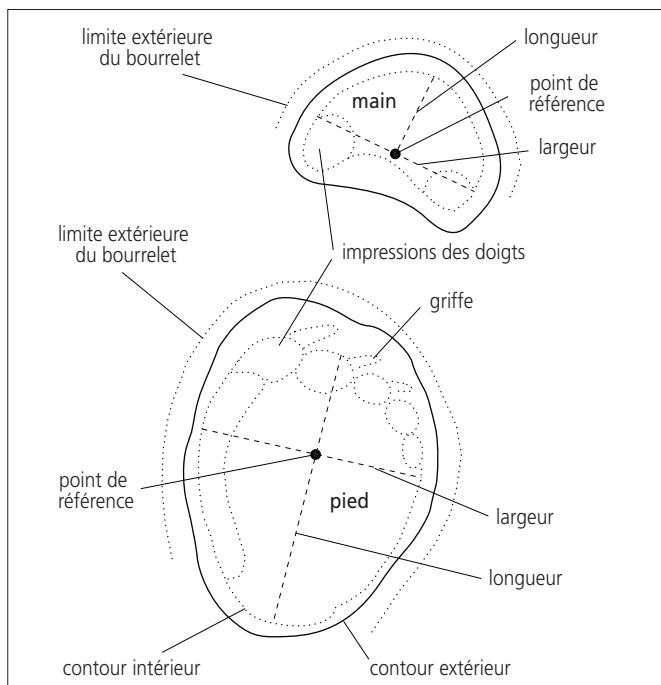


Fig. 77. Schéma d'un pied et d'une main de sauropode. Les points de référence, correspondant à l'intersection de la longueur et de la largeur des empreintes, sont indiqués.

La **profondeur** de l'empreinte est mesurée entre son point le plus bas et le point le plus élevé, soit du bourrelet, soit de la surface de la trace s'il n'y a pas de bourrelet.

Détails anatomiques: griffes, doigts

Les empreintes de sauropodes des sites de l'A16 ont livré moins de détails anatomiques que les empreintes tridactyles. Des marques de doigts ont été identifiées sur les traces de pieds; les traces de griffes sont moins fréquentes. Les détails anatomiques sont plus rares pour les empreintes de mains (chap. 6.1.2).

6.1.4.2 Pistes de sauropodes

La mesure des paramètres de pistes inclut celle de l'enjambée, du pas, ainsi que la largeur et la rotation des empreintes de pieds et de mains (fig. 74 et 78). La distance gléno-acétabulaire et l'orientation de la piste sont également mesurées. La longueur totale de la piste a, quant à elle, été calculée sur les plans vectorisés au moyen du logiciel Adobe Illustrator (chap. 6.3.4).

Pour les sauropodes, c'est le point d'intersection entre la longueur et la largeur de l'empreinte (pied ou main) qui est utilisé pour les mesures de paramètres de pistes, sans tenir compte du bourrelet de déplacement (Leonardi 1987; Thulborn 1990; Lockley 1991) (fig. 77). Il s'agit de la meilleure manière de définir un point de référence, même si dans certains cas il n'est pas aisément déterminer, notamment lorsque les empreintes de mains sont partiellement surimprimées par les empreintes de pieds.

Des diverses mesures prises sur le terrain, l'enjambée correspond à la distance entre les points de référence de deux impressions successives du même pied ou de la même main, donc de même latéralité: pied gauche-pied droit, par exemple.

Lorsque l'empreinte consécutive du même genre (pied ou main) est absente, les mesures sont réalisées avec la prochaine empreinte de même latéralité existante. Dans ce cas de figure, la colonne **facteur** est renseignée. Un facteur 2 signifie par exemple que l'empreinte subséquente est absente, et que c'est l'empreinte suivante qui est utilisée (fig. 75).

Le **pas** correspond à la distance entre les points de référence de deux empreintes successives de pied ou de main de latéralité opposée: pied gauche-pied droit, par exemple (fig. 78).

La **rotation** des pieds et des mains est également un paramètre mesuré. Lors des premiers travaux de documentation, l'angle mesuré pour la rotation des mains et des pieds était celui formé entre la ligne médiane et la ligne définissant la longueur de l'empreinte (fig. 74). Il ne s'agit pas de la rotation absolue, puisqu'elle n'est pas mesurée par rapport au nord géographique, mais par rapport à la ligne médiane de la piste.

Le positionnement de cette ligne étant relativement arbitraire, c'est, par la suite, la rotation de chaque empreinte par rapport à la ligne de l'enjambée qui a été mesurée. Pour cette nouvelle méthode, l'angle pris en compte est celui formé par l'intersection entre la ligne de l'enjambée et la ligne de la longueur du pied ou de la main. Lorsque l'empreinte de pied ou de main suivante manque, l'enjambée permettant la mesure de la rotation sera établie avec la prochaine empreinte présente (fig. 78). Lorsque la direction de l'empreinte est orientée vers l'extérieur par rapport à la ligne de l'enjambée, la rotation est indiquée par un angle à valeur positive. À l'inverse, si l'empreinte est dirigée vers l'intérieur, la valeur de l'angle de rotation sera négative.

L'**angle du pas** correspond à l'angle existant entre trois empreintes de pied ou de main successives. Il est mesuré au point de référence de l'empreinte concernée, correspondant au sommet d'un triangle (fig. 78). Cette valeur a été mesurée sur le terrain et n'est pas issue d'un calcul trigonométrique.

La **largeur de piste** (*trackway width*; Thulborn 1990) est mesurée en prenant en compte un point donné (point de référence) de l'empreinte d'un pied ou d'une main et l'enjambée des empreintes antécédente et subséquente opposées de même type. Cette distance est mesurée à angle droit avec l'enjambée. Elle pourrait également être mesurée par le théorème de Pythagore, en prenant en compte les enjambées en relation avec les pas (fig. 78).

Une autre manière d'interpréter l'écartement de la piste (*trackway gauge*) a été définie par Farlow (1992) pour classifier les pistes de sauropodes. Il a défini différents types d'écartements. Les pistes étroites (*narrow-gauge*) sont celles dont les empreintes sont proches ou touchent la ligne médiane de la piste. Les pistes larges (*wide-gauge*) étant logiquement celles dont les empreintes sont éloignées de la même ligne. Une des faiblesses de cette interprétation est qu'elle ne permet pas de définir clairement les pistes intermédiaires.

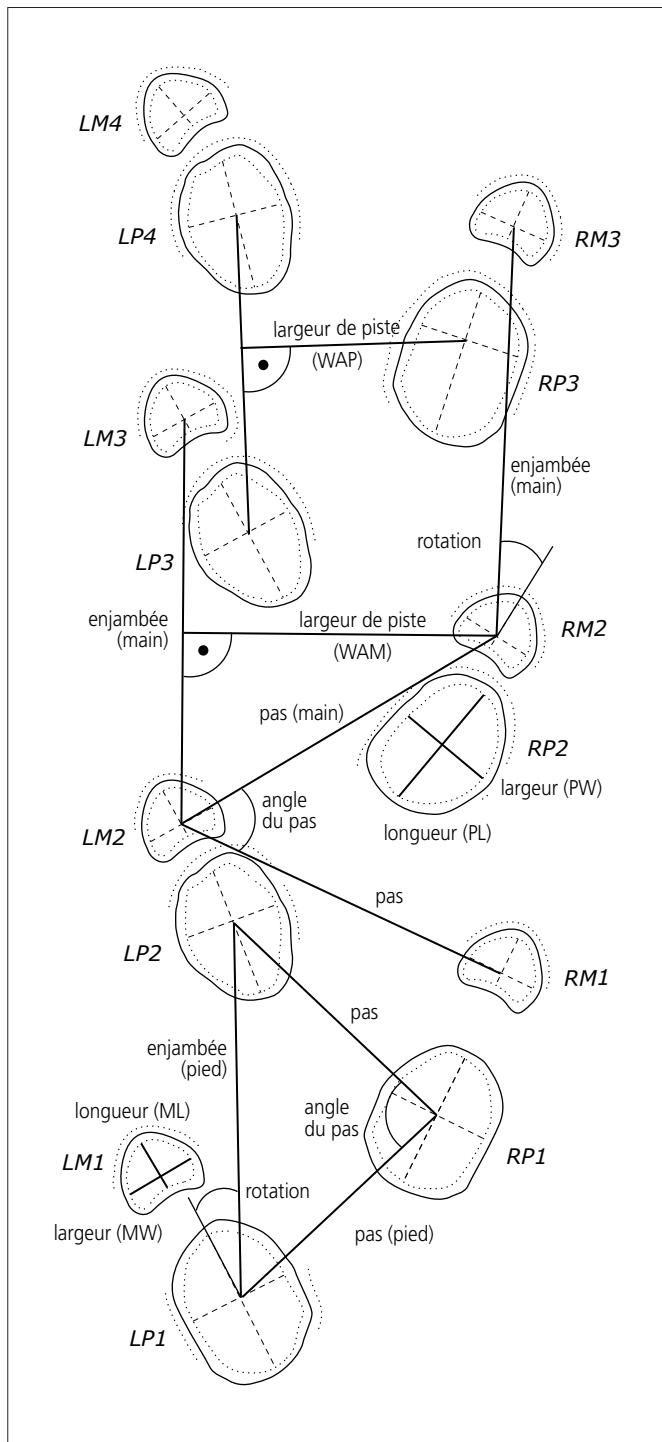


Fig. 78. Représentation des paramètres mesurés.

De plus, la largeur de voie telle que déterminée par Farlow est difficile à identifier pour les pistes formées de petites empreintes, qui apparaissent souvent comme étant plus proches de la ligne médiane qu'elles ne le sont en réalité. Afin de préciser la typologie définie par Farlow, Lockley et al. (1994) et Meyer et al. (1994) ont proposé une troisième catégorie de largeur de piste (fig. 79), les pistes à écartement moyen (*medium-gauge*), tout en stipulant qu'une classification des pistes de dinosaures quadrupèdes basée sur la seule largeur des pistes est hasardeuse. En effet, Lockley et al. (2002) ont défini que chez certains sauropodes, la largeur de piste peut passer d'« étroite » à « large » durant l'ontogénie.

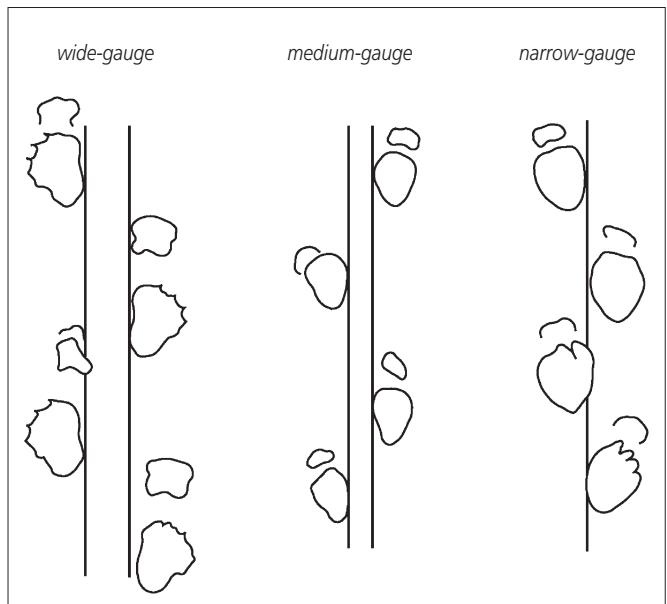


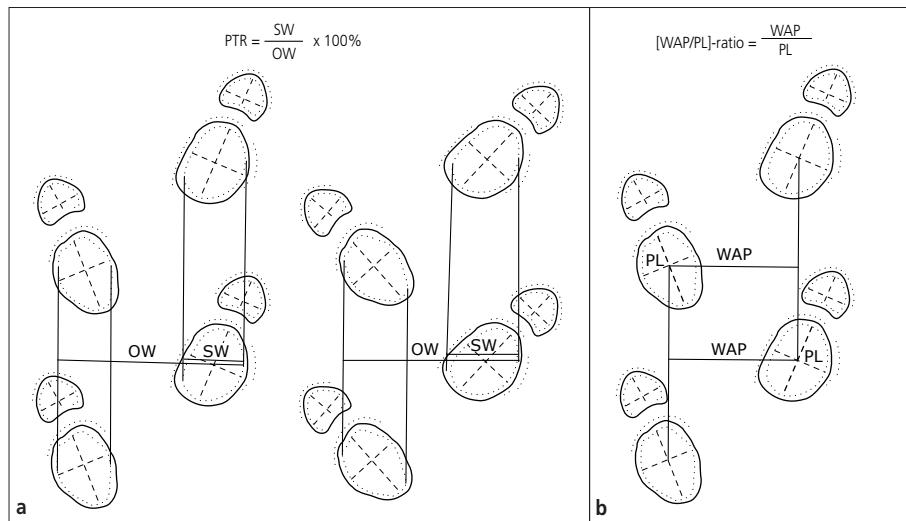
Fig. 79. Représentation des trois types de largeurs de piste des sauropodes (modifié d'après Meyer et al. 1994; Lockley et al. 1994).

Farlow (comm. pers. 2004, in Wright 2005) a démontré que certaines pistes de l'ichnogenre *Brontopodus* (définissant un type de piste large, à l'inverse de l'ichnogenre *Parabrontopodus* qui définit, tout comme l'ichnogenre *Breviparopus*, un type de piste étroit) sur le site de Paluxy River (Glen Rose, Texas, États-Unis) montrent une locomotion de type « étroit », contrairement à ce qui était attendu. Enfin, sur les sites de la Paléontologie A16, certains sauropodes ont une démarche passant d'« étroite » à « large » au sein d'une même piste (p. ex. Béchat Bovais couche 515, S18 et S19). Les différences de consistance du substrat lors de l'enregistrement de la piste – de même qu'une accélération, une décélération ou un changement de direction – pourraient avoir contribué à ces différences de configuration au sein d'une même piste. Ainsi, l'importance du concept de « trackway gauge » est fortement débattu et remis en question, selon Romano et al. (2007) la largeur de piste n'a que très peu de valeur en termes de systématique.

Pourtant, prolongeant la réflexion de Farlow (1992), Romano et al. (2007) ont introduit le concept « trackway ratio, TR » (utilisé soit pour les pieds (PTR) soit pour les mains MTR) afin de permettre une identification plus précise de la largeur de pistes des dinosaures quadrupèdes. Romano propose de faire le rapport entre la largeur latérale de l'empreinte (SW: side width) et la largeur totale de la piste, distance comprise entre la largeur extérieure du pied gauche et celle du pied droit (OW: overall width) (fig. 80). Cette méthode a notamment comme inconvénient le fait que la largeur latérale des empreintes dépend fortement de leur rotation. C'est pourquoi, dans sa thèse de doctorat, D. Marty (2008) propose à titre comparatif d'étudier le rapport entre la largeur de la piste (WAP: width of the angulation pattern; Thulborn 1990) et la longueur du pied afin de caractériser l'écartement des pistes (WAP/PL) (fig. 80). Ce nouveau ratio n'est pas, quant à lui, affecté par l'orientation des pieds (chap. 6.1.6).

SW (side width of pes track): largeur latérale de l'empreinte
 OW (overall width of trackway): largeur totale de la piste
 WAP (width of the angulation pattern): largeur de la piste
 PL (pes length): longueur du pied

Fig. 80. Représentations schématiques de pistes de sauroptérygiens illustrant les différentes mesures de rapports liés à la largeur de la piste: a) PTR, affecté par l'orientation des pieds (Romano et al. 2007); b) WAP/PL, indépendant de l'orientation des pieds (Marty 2008).



La **distance gléno-acétabulaire** donne une indication de la taille du corps de l'animal, comprise entre l'épaule et la hanche. Du point de vue strictement anatomique, elle correspond à la distance entre le centre de l'articulation de l'épaule (cavité glénoïdale) et le centre de l'articulation de la hanche (cavité acétabulaire). Du point de vue ichnologique, cette valeur est estimée par des mesures sur les pistes. Il s'agit de prendre en compte la ligne médiane qui coupe le pas de deux pieds et le pas de deux mains successifs par le milieu (fig. 81).

Selon les critères de mesures préétablis (chap. 6.1.2), il a été considéré que les empreintes des pattes avant qui correspondent à la même foulée que les pattes arrière se trouvent non pas à l'extrême proximité de celles-ci, mais à la séquence suivante (fig. 82 : empreintes en gris foncé).

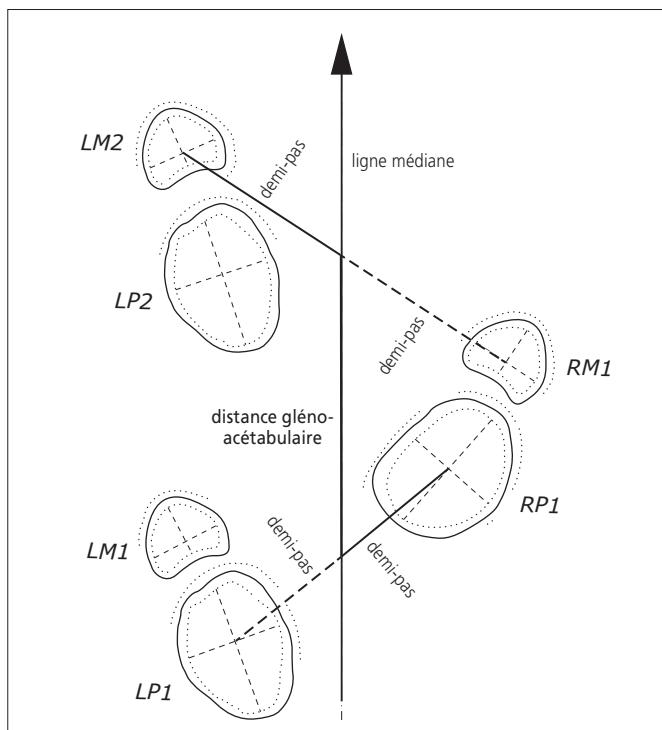


Fig. 81. Définition de la distance gléno-acétabulaire.

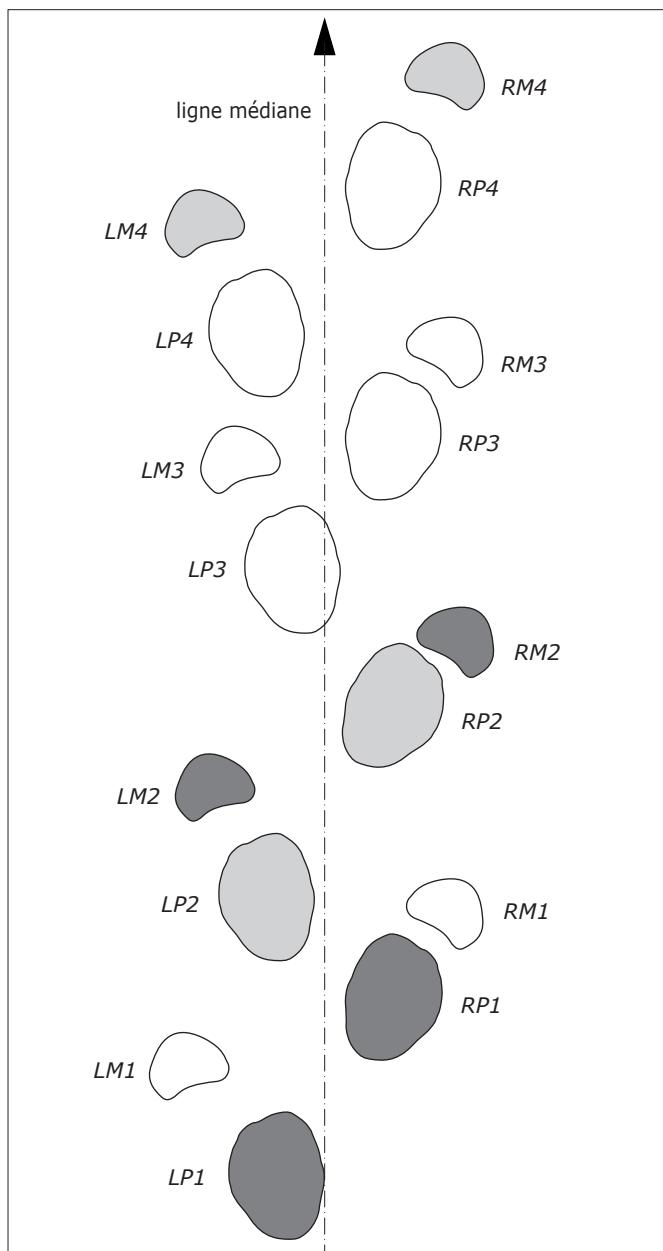


Fig. 82. Empreintes prises en compte par la Paléontologie A16 pour la mesure de la distance gléno-acétabulaire, en gris foncé, et une des propositions de Kent A. Stevens, en gris clair (modifié d'après Stevens et al. 2016, fig. 9).

Il faut cependant tenir compte du fait que ne sachant pas comment se déplaçaient les dinosaures, il n'est pas certain que cette numérotation concorde avec l'alternance réelle des pattes avant et arrière des animaux quadrupèdes. En effet, l'étude des pistes de dinosaures ne permet pas de définir l'allure de marche, à savoir si les dinosaures se déplaçaient par bipèdes diagonaux (en posant les membres antérieur droit-postérieur gauche, puis les membres antérieur gauche-postérieur droit) ou par bipèdes latéraux (en posant les membres antérieur droit-postérieur droit, puis les membres antérieur gauche-postérieur gauche), donc à l'amble. D'après les études de Kent A. Stevens (p. ex. Stevens et al. 2016), l'agencement des empreintes défini par la Paléontologie A16 selon l'ichnologie classique (p. ex. Leonardi 1987) ne correspondrait pas à la réalité. Pour lui, les pattes avant des sauropodes seraient posées plutôt deux à trois séquences plus avant dans la piste que ce qui a été mesuré (fig. 82, empreintes en gris clair). De ce fait, les données issues des mesures de la distance gléno-acétabulaire ne permettent pas de définir la valeur réelle de la taille du tronc des sauropodes. Ces données conservent cependant une valeur indicative de la distance existant sur le terrain entre les pieds et les mains, et permettent une bonne comparaison des différentes pistes entre elles.

Typologie des pistes de sauropodes

Dans son travail de doctorat, D. Marty (2008) définit une typologie des pistes de sauropodes à partir du site de Chevenez-Combe Ronde. Se référant à la typologie générale utilisée pour les pistes d'animaux quadrupèdes, il y décrit cinq types de pistes,

dont les critères dépendent de la présence ou de l'absence des empreintes de mains et de pieds (fig. 83) :

- 1) pistes quadrupèdes (*quadrupedal trackways*);
- 2) pistes avec empreintes de pieds uniquement (*pes-only*);
- 3) pistes avec empreintes de mains uniquement (*manus-only*);
- 4) pistes dominées par les pieds (*pes-dominated*);
- 5) pistes dominées par les mains (*manus-dominated*).

L'absence d'empreintes de mains (*pes-only*) est considérée comme étant due à leur surimpression par les empreintes de pieds, alors que l'absence d'empreintes de pieds (*manus-only*) est plutôt considérée comme étant un biais de préservation.

6.1.4.3 Empreintes tridactyles

Les empreintes tridactyles sont reconnaissables par l'impression dans le terrain de la forme caractéristique du pied comportant trois doigts. Dans un souci d'homogénéité, c'est l'extrémité distale du doigt central III, dont la caractéristique est d'être plus long que les deux doigts latéraux, qui est utilisée comme point de référence pour les mesures de paramètres d'empreintes et de pistes (fig. 84a). C'est de plus le seul doigt dont l'empreinte est presque toujours préservée.

La méthode de mesure utilisée est la même que pour les sauropodes. Cependant, les particularités morphologiques des empreintes tridactyles font que les paramètres mesurés ne sont pas tous identiques à ceux des sauropodes, et qu'ils doivent être clairement définis.

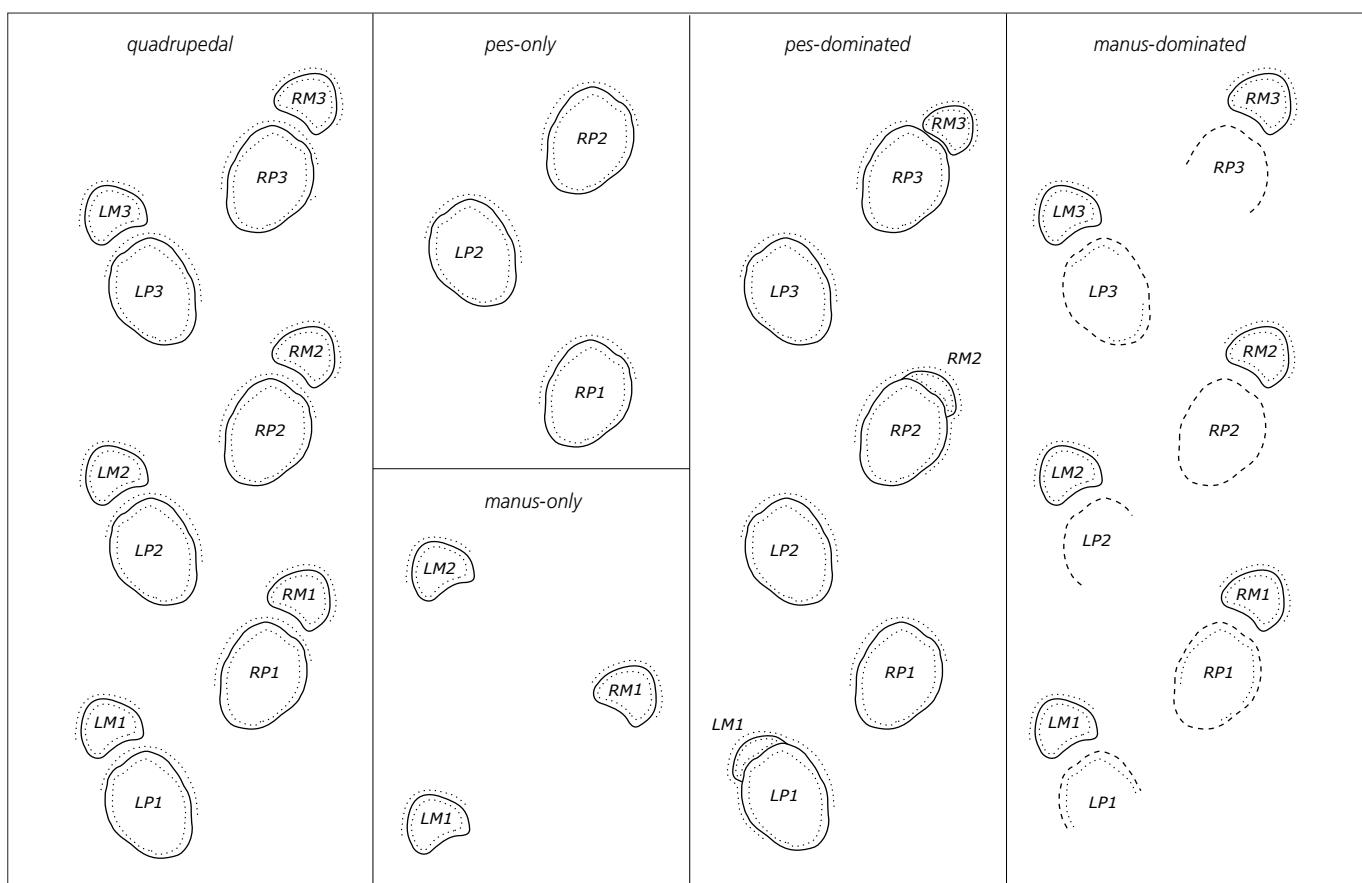


Fig. 83. Typologie des pistes de sauropodes (modifié d'après Marty 2008).

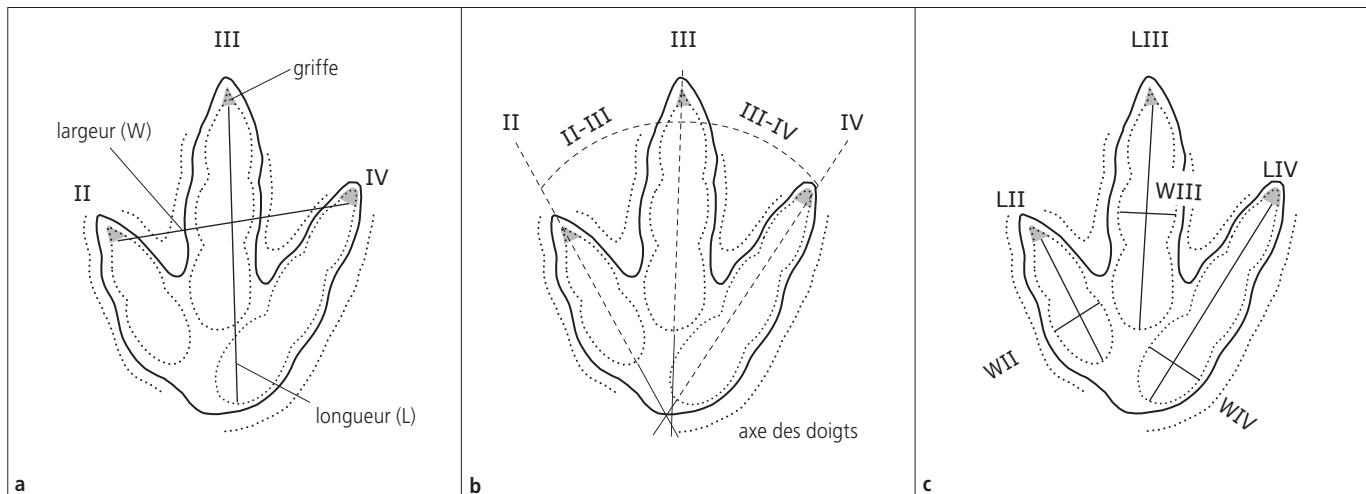


Fig. 84. Paramètres des empreintes tridactyles mesurés: a) longueur et largeur de l'empreinte; b) divergence des doigts; c) longueur et largeur des doigts (modifié d'après Marty 2008).

Les caractères mesurés pour les empreintes tridactyles sont la longueur et la largeur totales de l'empreinte, la longueur des doigts, ainsi que les angles de divergence entre les doigts II et III, et entre les doigts III et IV. La taille du doigt III par rapport aux doigts latéraux peut être une indication utile à la détermination de l'ichnoespèce. Il en est de même pour l'angle de divergence des doigts latéraux (fig. 84b).

Longueur et largeur de l'empreinte

La longueur de l'empreinte est mesurée en partant du point le plus antérieur du doigt III (sans tenir compte de la griffe), le long de la ligne le reliant à la base de l'empreinte (fig. 84a). L'impression éventuelle dans le terrain du talon ou du métapode est comptabilisée dans la longueur totale de l'empreinte.

La largeur est mesurée en prenant en compte la distance entre les points les plus antérieurs des doigts II et IV (fig. 84a). Les griffes ne sont pas prises en compte. De fait, l'axe mesuré ne fait pas obligatoirement un angle droit avec l'axe de la longueur de l'empreinte. Il ne correspond pas non plus nécessairement à la largeur maximale de l'empreinte.

Axes des doigts

Pour permettre les mesures de divers paramètres, l'empreinte de chaque doigt est séparée en deux moitiés quasi symétriques par un axe fictif partant du point le plus antérieur du doigt (sans prendre en compte l'empreinte des griffes éventuelles) pour rejoindre la base de l'empreinte (fig. 84b). À noter que dans la plupart des cas, les trois axes ne se rejoignent pas en un seul point d'intersection : les empreintes ne sont pas symétriques.

Angle de divergence des doigts II-III et III-IV

Les angles de divergence correspondent aux angles formés par les intersections des axes de symétrie des doigts (fig. 84b). Sont mesurés l'angle entre les doigts II et III et celui entre les doigts III et IV. Quant à l'angle entre les doigts II et IV, il correspond à la somme des angles interdigitaux II-III et III-IV et n'est pas mesuré sur le terrain.

Longueur et largeur des doigts

Dans le cas des empreintes isolées, voire pour les pistes à deux empreintes, il n'est pas toujours aisément sur le terrain de savoir si l'on est en présence d'une empreinte de pied droit ou gauche. La mesure des doigts latéraux peut, dans ce cas, être utile puisqu'en principe le doigt externe IV est plus long que le doigt interne II.

La longueur et la largeur de chaque doigt sont mesurées. Cependant, les empreintes des doigts étant souvent courbées, irrégulières ou mal imprimées, il est difficile d'appliquer une méthode systématique de mesure. La longueur des doigts est en principe mesurée entre le point le plus antérieur du doigt (sans tenir compte de la présence d'éventuelles griffes) et sa partie la plus postérieure, le long de son axe de symétrie. La largeur mesurée correspond à la largeur maximale du doigt faisant un angle droit avec l'axe de symétrie (fig. 84c).

Détails anatomiques: griffes et doigts

Les griffes de chaque doigt, lorsqu'elles sont visibles, sont mesurées de manière séparée. Ce type de détail anatomique est fréquemment discernable sur les empreintes tridactyles des fouilles de l'A16, de même que les marques des phalanges qui, lorsqu'elles sont présentes, ont également été documentées mais n'ont cependant pas fait l'objet de mesures (chap. 6.1.2).

6.1.4.4 Pistes de tridactyles

Les paramètres mesurés pour les pistes de dinosaures tridactyles sont les mêmes que ceux mesurés pour les sauropodes. Par contre, la distance gléno-acétabulaire ne peut pas être mesurée sur des pistes bipèdes (fig. 85).

Des fichiers Excel ont été élaborés afin d'enregistrer toutes les données mesurées sur le terrain dans des fichiers informatiques (chap. 6.1.5). En plus de conduire à une conservation optimale des données, ils permettent, grâce aux formules insérées, d'appréhender rapidement les moyennes des différents paramètres. Les moyennes et les écarts types des paramètres ont ensuite été compilés dans des fichiers spécifiques : les fichiers statistiques (chap. 6.1.6).

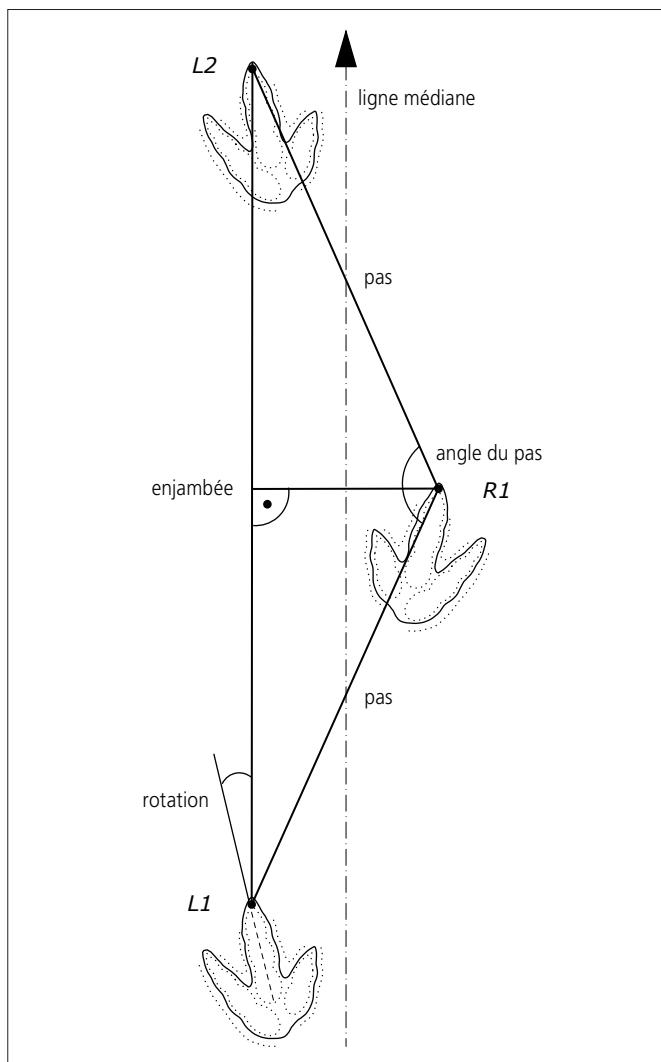


Fig. 85. Paramètres mesurés pour les pistes d'empreintes tridactyles (modifié d'après Marty 2008).

6.1.5 Paramètres de pistes: données informatisées

Les paramètres d'empreintes et de pistes de dinosaures mesurés sur le terrain ont été insérés dans des fichiers informatiques Excel. En plus de permettre la mise en évidence des moyennes des différentes données issues du terrain, la réalisation de tels fichiers a rendu possible l'insertion de formules mathématiques calculant la taille et la vitesse de déplacement des dinosaures.

Les paramètres mesurés pour les dinosaures quadrupèdes et les dinosaures bipèdes différant légèrement, deux types de fichiers ont été créés, un pour les sauroptodes et un pour les tridactyles, comme pour les documents de terrain (fig. 86). À noter que si le fichier de terrain pour les bipèdes s'intitule encore **théropodes**, le fichier informatisé a reçu le nom de **tridactyles**, l'expérience ayant démontré que l'on ne peut exclure l'existence d'autres types de bipèdes en plus des théropodes sur les sites de la Paléontologie A16.

Les fichiers informatiques sont en couleur – chacune ayant une signification précise – afin d'en faciliter la lecture. Tout d'abord, les cases blanches contiennent les valeurs retranscrites directement des fichiers de terrain.

Les cases jaunes signalent un champ non renseigné et sont donc vides de toute information. Une empreinte ne peut pas appartenir à la fois au train avant et au train arrière de l'animal, par exemple. La couleur grise indique que les données ne peuvent être mesurées. Si l'empreinte est absente (non imprimée ou effacée par l'érosion), toute la ligne est grisée et le numéro de l'empreinte est barré. Si les données ne peuvent être évaluées vu la mauvaise préservation de tout ou d'une partie de l'empreinte, seules les cases concernées sont grisées. Pour une empreinte spécifique, certains paramètres de pistes ne peuvent être mesurés car c'est l'empreinte précédente et/ou suivante qui est absente.

Les informations se trouvant dans les cases bleues sont issues non pas des mesures de terrain mais de calculs informatiques, qu'il s'agisse de moyennes (écart type, p. ex.), de multiplications (hauteur à la hanche), de formules mathématiques (progression) ou du résultat d'une équation (vitesse). Les cases bleues et vides indiquent que la valeur ne peut être calculée. Les indications relatives à la différence gauche/droite (diff. gauche/dr.) de la rotation ou de la progression, par exemple, s'affichent en fonction de la valeur la plus élevée, soit pour la latéralité gauche, soit pour la latéralité droite, mais en aucun cas aux deux endroits en même temps (fig. 86). L'affichage de la moyenne (moyenne av./ar.) et celui de la différence avant/arrière (diff. av./ar.) ne se font également que dans l'une des deux cases, correspondant soit au train avant, soit au train arrière du dinosaure.

Lors des mesures sur le terrain, certaines données ont été mises entre parenthèses, signifiant qu'elles ne seront pas prises en compte dans les différentes moyennes des fichiers. C'est le cas pour les paramètres des empreintes lorsque celles-ci sont mal préservées, peu visibles, voire incomplètes. Les valeurs des paramètres de pistes sont, elles, entre parenthèses lorsqu'une empreinte liée à une mesure spécifique est absente ou mal conservée, ou par exemple lors de la présence d'une faille. Elles sont considérées comme mesurables contrairement aux données non évaluées (cases grises) car impossibles à mesurer ou trop approximatives. Même si elles manquent de précision, les données entre parenthèses peuvent être utilisées comme valeurs indicatives. Dans la base de données relative aux paramètres d'empreintes et de pistes (chap. 6.1.7), il est possible d'utiliser ces valeurs approximatives dans les moyennes.

L'utilisation des parenthèses dans le logiciel Excel ne conduit pas à l'annulation des données pour le calcul des moyennes. C'est pourquoi dans les fichiers informatiques, les parenthèses ont été remplacées par un astérisque *.

Le bandeau du fichier comporte les informations générales permettant la distinction des quelque 500 pistes de dinosaures traitées dans les fichiers paramètres, sur un total de 663 pistes que comptent les Catalogues du patrimoine paléontologique jurassien. Sont à chaque fois inscrits le nom du site, le numéro de la couche et du secteur concernés, ainsi que le nom de la piste (pour la nomenclature des pistes, chap. 6.1.2). Les initiales des intervenants sur le terrain, avec la date de prise de mesures, sont également mentionnées, tout comme les initiales de la personne

site	couche	secteur	piste	Paramètres de la piste												orientation en degré (°)	nom	date																	
TCH	1000	12	S7													entrée	sortie	directe	relevé	GPa	13.11.2006														
																359	2	0	GPa	longueur (m)	6.7	saisie	CL	26.02.2007											
Mesures des empreintes				Mesures des pistes												Mesures des pistes				Mesures des pistes															
				Train arrière												Train avant				Train arrière															
				Train arrière				Train avant				Train arrière				Train avant				Train arrière															
				gauche		droite		gauche		droite		gauche		droite		gauche		droite		gauche		droite													
				longueur	largeur	profondeur	rotation	longueur	largeur	profondeur	rotation	enjambée	facteur	largeur	pas	progression	pas	progression	angle du pas	enjambée	facteur	largeur	pas	progression	angle du pas										
				L	R	L	R	cm	cm	cm	°	cm	cm	cm	cm	cm	cm	°	cm	cm	cm	cm	cm	°											
				mains (train avant)																															
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											
				mesures												mesures				mesures				mesures											

ayant renseigné les fichiers informatiques, avec la date de saisie. Ce dernier type de données doit permettre une vérification lors de l'identification d'éventuelles erreurs ou de données contradictoires, en se référant par exemple à la chronologie des travaux de documentation.

La longueur de la piste est également notifiée. Ces valeurs ont été calculées au moyen du logiciel Illustrator sur les mêmes plans que ceux utilisés pour les mesures des orientations (chap. 6.3.4). Enfin, l'orientation de la piste est aussi indiquée. Les pistes de dinosaures n'étant pas rectilignes, un procédé de mesures a été défini, qui prend en compte trois orientations principales (chap. 6.3.4). Ainsi, la valeur de l'orientation E correspond à l'angle d'entrée de la piste dans la zone observée, l'orientation S à l'angle de sortie de la piste, et l'orientation D à l'angle de la ligne directe indiquant l'orientation générale de la piste.

Les différentes colonnes du fichier informatique indiquent tout d'abord le nom des empreintes (chap. 6.1.2). Pour les pistes de sauropodes, les mesures issues du terrain sont retranscrites dans les fichiers informatisés selon la même disposition que sur les fiches de terrain, comme pour les pistes de tridactyles (chap. 6.1.4). Pour des questions de lisibilité, la valeur moyenne des griffes a été transférée dans les fichiers statistiques et le détail de leur longueur dans une liste Excel relative aux détails anatomiques (chap. 3 de chaque catalogue des sites à traces).

Si une piste est en général considérée comme telle avec la présence d'une suite d'au minimum trois empreintes (Marty 2008), des pistes tridactyles à deux empreintes ont néanmoins été prises en compte lorsqu'une suite d'empreintes appartenant au même animal était clairement définie. Ce sont ainsi 409 pistes de dinosaures tridactyles et 254 pistes de sauropodes qui ont été documentées par la Paléontologie A16. Cependant, les paramètres de pistes de la couche 500 du site de Courtedoux-Béchat Bovais n'ont pas été mesurés. Seuls 256 fichiers paramètres existent donc pour les tridactyles, et 237 pour les sauropodes.

Les mesures de terrain concernant les pistes ont toutes été transférées dans les fichiers informatiques. Un paramètre y a été ajouté, celui de **progression**. Il s'agit d'une variable calculée au moyen du théorème de Pythagore, utilisant les données issues des mesures du pas et de la largeur de la piste (fig. 87). La progression représente le mouvement en avant d'un individu dans la direction de la piste le temps d'un pas. Elle est calculée à la fois pour les mains et pour les pieds, droits et gauches, et est définie au moyen de la formule mathématique suivante :

$$\text{Progression} = [(pas)^2 - (largeur)^2]^{0.5}$$

Dans le bas du fichier sont insérés différents calculs issus des données mesurées.

La **moyenne**, tout d'abord, exprime la valeur médiane pour chacun des paramètres. Cette mesure étant sensible aux valeurs extrêmes, les écarts types seront utilisés afin d'identifier les valeurs singulières (voir ci-dessous). C'est à partir des moyennes

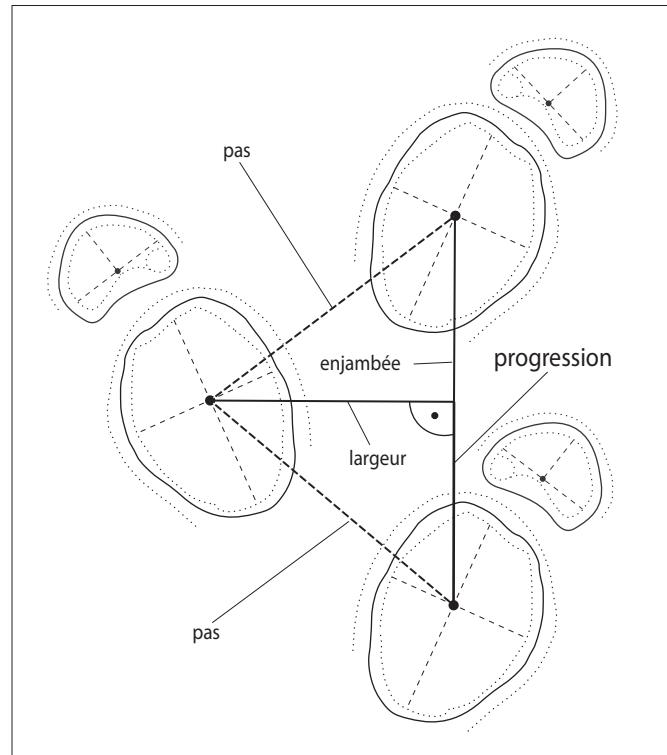


Fig. 87. Représentation schématique de la progression d'un pied droit de sauropode.

que seront calculés plusieurs paramètres. La moyenne de la longueur du pied, par exemple, permettra d'estimer la hauteur à la hanche des dinosaures et, au final, leur vitesse; la moyenne de l'enjambée, en lien avec la hauteur à la hanche, servira quant à elle à définir leur allure.

Dans la suite du fichier, l'écart moyen et l'écart type sont renseignés. L'**écart moyen** est spécifié à titre indicatif. Il se définit comme la moyenne des écarts à la moyenne des valeurs de la distribution.

L'**écart type** mesure la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne. Il est utile pour évaluer la précision de l'estimation de la moyenne d'une variable en chiffrant l'écart entre les différentes valeurs et la moyenne. Un écart type élevé peut signaler l'existence d'une valeur singulière.

La valeur **maximum** correspond à la valeur la plus élevée de la série statistique. Dans les fichiers, elle correspond à la plus grande valeur mesurée pour chacun des paramètres et est mentionnée à titre indicatif.

La **différence gauche/droite** prend en compte la différence entre la moyenne gauche et la moyenne droite de plusieurs paramètres, afin de vérifier la concordance entre les deux latéralités. Ces moyennes sont calculées pour la rotation des empreintes ainsi que pour la progression. On s'accorde à admettre que les différences de la position relative des pieds et des mains, ainsi que les différents degrés de la rotation vers l'extérieur, peuvent relater le comportement des individus, par exemple la station debout ou l'accélération, le fait de tourner le cou vers la gauche ou la droite,

la présence d'un autre animal à proximité, voire une pathologie de l'animal (boiterie). Ces différences peuvent également être liées aux propriétés du substrat et à la vitesse de déplacement, voire être l'expression du style de marche d'un individu, tous les animaux d'une même espèce ne se déplaçant pas forcément de la même manière (Marty 2008).

Pour les pistes de sauropodes, la **moyenne** (moyenne av/ar.) ainsi que la **différence de l'enjambée du train avant et du train arrière** (diff. av/ar.) sont également calculées. Dans le fichier, il y avait lieu de définir dans la colonne de quelle latéralité inscrire le résultat des calculs des différences gauches/droites de la rotation et de la progression. Le choix s'est porté sur la colonne qui correspond à la valeur de la moyenne la plus élevée. En revanche, les données relatives à la moyenne et à la différence du train avant et du train arrière sont enregistrées arbitrairement au centre des lignes prévues à cet effet, ceci pour des questions de lisibilité. Les sauropodes ayant les pattes avant et arrière de longueur différente, ces données peuvent apporter des informations sur l'ichnotaxinomie. Chez les diplodocidés, les pattes avant sont légèrement plus courtes que les pattes arrière. Chez les brachiosauridés en revanche, les pattes avant sont les plus longues.

De tous les calculs insérés dans les fichiers paramètres, seuls ceux relatifs à la moyenne ont jusqu'à présent fait l'objet d'une attention particulière de la Paléontologie A16. Grâce aux formules mathématiques utilisant les paramètres d'empreintes et de pistes mesurés sur le terrain, l'allure et la vitesse de déplacement des différents types de dinosaures peuvent être estimées, permettant une comparaison des différentes pistes entre elles. La mesure des empreintes fossiles a également le potentiel de révéler des informations sur la taille des individus, ainsi que de donner des indications sur le comportement et l'environnement dans lequel vivaient les animaux.

Les observations du zoologue Robert McNeill Alexander (1976) sur le déplacement d'animaux actuels l'ont conduit à définir trois allures dans le mouvement des vertébrés terrestres : une allure lente, la marche (*walk*), une allure intermédiaire, que l'on pourrait qualifier de trot (*trot*), et une allure rapide, comme le galop (*run*). Alexander a tiré de ses observations des liens entre la vitesse, l'enjambée et la taille des animaux vivants, notamment des éléphants d'Afrique et des autruches. Thulborn & Wade (1984) ont utilisé ses observations pour définir trois allures de déplacement pour les dinosaures. Dans ce but, les auteurs utilisent le rapport enjambée/hauteur à la hanche (*SL/h* : *stride length/heighth*), soit la longueur relative de la foulée. Ces données sont retranscrites dans les fichiers statistiques des moyennes des pistes de sauropodes et de théropodes (chap. 6.1.6). La longueur relative de la foulée n'est pas seulement un indicateur de l'allure des dinosaures : elle est aussi utilisée pour estimer leur vitesse absolue. Afin d'estimer la vitesse d'un dinosaure à partir de sa piste, la mesure de l'enjambée est réalisée sur le terrain. La **hauteur à la hanche** (*h*) ne peut cependant être mesurée à partir de la piste.

Une attention particulière doit être portée au calcul de cette variable. Dans l'idéal, seules les empreintes bien préservées

devraient être prises en compte. Dans les fichiers de la Paléontologie A16, les données mesurées considérées comme peu fiables (empreintes mal préservées, présence de failles, etc.) sont documentées uniquement comme valeurs indicatives et ne sont pas utilisées pour les calculs. D'après les différentes études en ichnologie (p. ex. Thulborn 1990), la valeur *h* peut être mesurée directement sur le squelette ou estimée à partir de la longueur des empreintes. Dans ce cas, chez les auteurs pris en considération, deux méthodes sont mentionnées pour définir la hauteur à la hanche : la méthode géométrique et celle des « ratios morphométriques ».

La première méthode utilise la trigonométrie. La longueur du pas du dinosaure, issue des mesures de terrain, est considérée comme la base d'un triangle isocèle (fig. 88) ; les deux côtés égaux du triangle représentent les jambes arrière de l'animal ; la ligne verticale séparant en deux l'angle du pas ainsi formé correspond à la hauteur à la hanche. Il existe des limites à cette méthode : l'angle de marche, exprimé par γ , doit être connu. Chez les animaux vivants, cet angle varie considérablement selon les espèces, mais également en fonction des vitesses de déplacement. Certains auteurs ont tenté d'estimer les valeurs de cet angle (Demathieu 1984), mais cela reste, selon Thulborn (1990), peu convaincant.

La seconde méthode est issue de l'observation des squelettes de dinosaures. Alexander (1976) note que, basée sur la reconstitution de squelettes, la hauteur des dinosaures à la hanche correspond à environ quatre fois la longueur de la partie du pied qui touche le sol. Il est ainsi possible d'estimer la hauteur à la hanche des dinosaures à partir des mesures de la longueur de l'empreinte de pied, tant pour les animaux bipèdes que quadrupèdes, en utilisant ce facteur constant de 4.

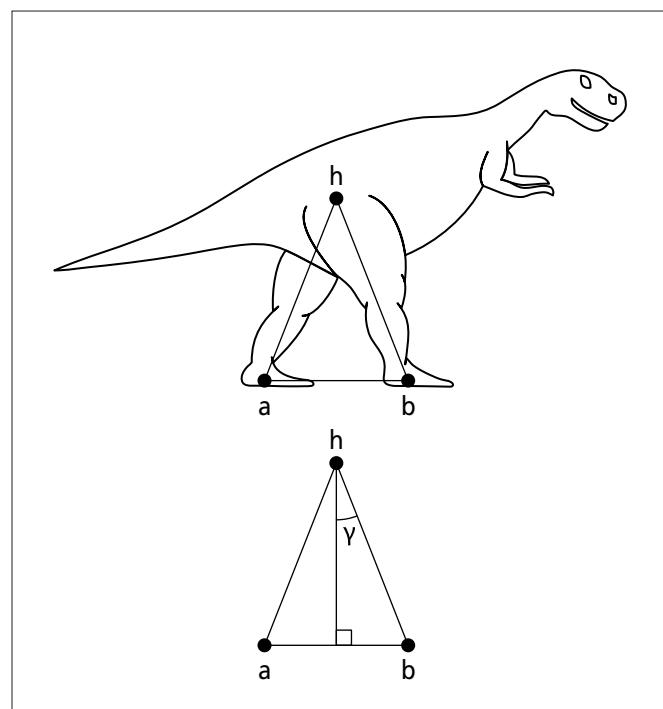


Fig. 88. Représentation schématique de la méthode géométrique pour le calcul de la hauteur à la hanche (Thulborn 1990).

Cependant, dans la littérature, la constante utilisée varie en fonction des auteurs et des types de dinosaures étudiés. S'il est vrai que la constante 4 est aisée à utiliser, il s'agit plutôt d'une règle empirique qui ne correspond pas entièrement à la réalité (Thulborn 1990). L'utilisation de ce ratio sous-entend que la taille du pied du dinosaure (FL : *foot length*) a une relation constante avec la hauteur de la hanche. Or le ratio h/FL varie très probablement selon les espèces ainsi que durant l'ontogénie, comme chez les tétrapodes actuels : les juvéniles ont un pied relativement plus grand et, par conséquent, un ratio h/FL plus petit que les adultes. Selon Thulborn toujours, et pour ces raisons, l'utilisation d'un seul ratio pour toutes les traces de dinosaures peut générer des estimations inexactes pour la valeur h. Il tempère néanmoins ses affirmations en stipulant que l'utilisation de ratios est intéressante pour les analyses préliminaires des données relatives aux pistes, surtout sur le terrain. Pour Thulborn (1989), il est donc préférable d'utiliser un ratio spécifique pour chaque groupe taxinomique ; il affine les estimations d'Alexander en utilisant des constantes différentes en fonction des groupes et de la taille des dinosaures.

Sur la base de ses analyses, sommaires, de données ostéométriques, l'auteur propose plusieurs ratios morphométriques pour différents groupes et tailles de dinosaures (Thulborn 1989). Pour en arriver à la définition de constantes, il tente de faire le lien entre la hauteur à la hanche et la taille estimée du pied. Il relève que ces facteurs sont intéressants à utiliser pour l'analyse préliminaire des données de pistes, surtout pour les petits dinosaures tridactyles pour lesquels la longueur du métatarsus est à peu près équivalente à la longueur de l'empreinte de pied. Pour les empreintes de grands sauroptodes, en revanche, la longueur de l'empreinte de pied est faussée par la présence de tissus mous dans la région du talon, rendant plus difficile l'estimation de la hauteur à la hanche.

Dans ses recherches, Thulborn utilise les ratios suivants, où FL (*foot length*) correspond à la longueur du pied :

petits théropodes	(FL < 25cm) : h ≈ 4,5FL
grands théropodes	(FL > 25cm) : h ≈ 4,9FL
petits ornithopodes	(FL < 25cm) : h ≈ 4,8FL
grands ornithopodes	(FL > 25cm) : h ≈ 5,9FL
petits dinosaures bipèdes, en général	(FL < 25cm) : h ≈ 4,6FL
grands dinosaures bipèdes, en général	(FL > 25cm) : h ≈ 5,7FL

Dans ses fichiers, la Paléontologie A16 prend en compte à la fois les recherches du zoologue anglais Robert McNeill Alexander et celles du paléontologue anglais Richard Thulborn. Un troisième auteur, Grace Irby, a d'abord été mentionné avant d'être abandonné, faute de sources bibliographiques fiables. Les données relatives à cet auteur sont cependant conservées, à titre indicatif, dans la base de données des paramètres (chap. 6.1.7).

Pour la définition des constantes pour les pistes de dinosaures tridactyles, ce sont les valeurs relatives aux grands théropodes (4,9) et aux petits dinosaures bipèdes (4,6) de Thulborn qui ont été privilégiées. Ce dernier ratio a été choisi puisque, sur les différents sites de la Paléontologie A16, les petites empreintes tridactyles n'appartiennent peut-être pas toutes à des théropodes.

Pour les dinosaures sauroptodes, Thulborn n'a pas défini de ratio spécifique. Selon lui, des recherches supplémentaires sur leur anatomie, notamment celle des tissus mous, et sur la posture de leurs pieds seraient nécessaires afin de pouvoir utiliser un rapport h/FL précis. D'après ses recherches, le cas des sauroptodes ressemble à celui des grands ornithopodes. C'est pourquoi il en utilise la constante 5,9 tant pour les grands que pour les petits sauroptodes.

Définir la hauteur à la hanche à partir de la longueur du pied des dinosaures comporte cependant des incertitudes. Comme déjà évoqué, le rapport entre la longueur du pied et la hauteur à la hanche des squelettes de dinosaures varie non seulement en fonction du taxon, mais aussi en fonction du stade de l'ontogenèse. Déterminer le taxon ou le stade de développement ontogénique des individus à partir de leurs traces est difficile. L'interprétation d'une piste est non seulement complexe par rapport aux critères liés à l'individu ayant laissé ses empreintes (identité taxinomique, taille, état de développement ontogénique, configuration des tissus mous), mais aussi par rapport aux critères liés à ses mouvements (vitesse, allure) (Stevens et al. 2016). De plus, les études de Manning (2004) démontrent que la dimension des traces dépend également du substrat sur lequel l'animal a marché. Ses comparaisons entre des traces de dinosaures du Yorkshire, en Angleterre, et des empreintes expérimentales ont démontré qu'une partie des différences morphologiques en ichnologie des vertébrés reflètent la rhéologie du sédiment ainsi que la taphonomie, plutôt que la taxinomie de leurs auteurs. De plus, le niveau sur lequel les empreintes ont été préservées joue un rôle important, puisque cela influe sur les dimensions enregistrées dans le terrain. En principe, les empreintes imprimées sur la couche inférieure (sous-empreintes ; chap. 6.1.1) sont plus grandes que les « vraies » empreintes enregistrées en surface, en raison de la différence de substrat, de l'humidité contenue dans le sédiment et des forces appliquées sur les surfaces (Romano et al. 2007). De fait, seules les surfaces sur lesquelles ont été imprimées les « vraies » empreintes devraient être utilisées pour définir la hauteur à la hanche des dinosaures (Manning 2004).

Mais selon Romano (2007), même si cette valeur peut varier légèrement selon son mode de calcul, il est généralement admis que les différents procédés utilisés sont à peu près équivalents, puisque l'on parle ici d'estimations.

Une fois la hauteur à la hanche définie, il est possible, grâce aux travaux d'Alexander (1976) et de Thulborn & Wade (1984), de calculer la **vitesse de déplacement** des dinosaures. Il s'agit une nouvelle fois d'une estimation mais, pour les différents auteurs considérés, la méthode donne une bonne approximation. Selon Alexander, en fonction de ses observations sur les vertébrés actuels, il semble en effet peu probable de confondre une allure de marche avec un sprint, par exemple.

Le rapport défini par Alexander entre la vitesse, la longueur de l'enjambée et la taille des animaux vivants l'a conduit à définir l'équation suivante :

$$SL/h \approx 2,3(V^2/gh)^{0,3}$$

où SL (*stride length*) correspond à la longueur de l'enjambée exprimée en mètres, h à la hauteur à la hanche, toujours en mètres, V à la vitesse en m/s et g à l'unité d'accélération de la pesanteur, soit 9,81 m/s².

Selon l'auteur, ce lien peut être appliqué tant aux petits qu'aux grands animaux, bipèdes ou quadrupèdes, pour toutes les allures, du pas à la course, et ne semble pas être très affecté par les variations de consistance du substrat.

Afin d'estimer la vitesse des dinosaures, Alexander a transformé son équation comme suit :

$$V \approx 0,25g^{0,5}SL^{1,67}h^{-1,17}$$

Cette équation a d'abord été utilisée dans tous les cas puisqu'elle donne, selon Thulborn (1990), des résultats réalistes. Cependant, il semble qu'elle ait tendance à légèrement sous-estimer les vitesses les plus lentes et à surestimer les vitesses les plus rapides (Alexander 1989). Elle a par la suite été utilisée uniquement pour les dinosaures qui marchent – donc avec un rapport SL/h < 2 – et modifiée pour les dinosaures qui courrent (SL/h > 2,9) ou qui ont une allure intermédiaire (SL/h < 2 < 2,9). Pour sa part, la Paléontologie A16 a utilisé dans ses fichiers l'équation de base d'Alexander pour tous les cas de figure, l'objectif étant d'estimer la vitesse des différentes pistes et de pouvoir les comparer. Un grand nombre de chercheurs a utilisé l'équation d'Alexander pour estimer la vitesse des dinosaures. Comme attendu par la plupart d'entre eux, il s'avère que la majorité des vitesses estimées suggère que les dinosaures se déplaçaient à une vitesse de marche, soit entre 2 et 10 km/h (p. ex. Farlow & Chapman 1997). Les seules pistes de dinosaures considérées comme étant le résultat de la course ou du galop de dinosaures sont celles de tridactyles.

Sur les sites de l'autoroute Transjurane, il en est de même. La totalité des pistes de sauropode mesurées montre qu'ils se déplaçaient lentement. En revanche, près d'un quart des pistes de tridactyles donnent des estimations d'animaux se déplaçant à une allure que l'on peut qualifier de trot (une centaine) ou de course (une dizaine). Ces données sont à considérer toutefois avec réserve, la majorité des pistes les plus rapides n'étant constituées que de trois à six empreintes.

Pour prendre connaissance des vitesses des dinosaures des sites de la Paléontologie A16, il est possible de se référer aux fichiers statistiques des moyennes des différents catalogues. En effet, des divers calculs réalisés dans les fichiers paramètres, ceux des moyennes ainsi que ceux des écarts types ont été compilés – par site, couche et numéro de piste – dans des fichiers séparés permettant notamment une vue d'ensemble optimale des données (voir les catalogues *Traces de dinosaures jurassiques*, liasses 2).

6.1.6 Paramètres de pistes : fichiers statistiques

Afin de permettre une comparaison rapide entre les différentes pistes d'un même site, voire de plusieurs sites entre eux, deux types de fichiers statistiques ont été à chaque fois établis : le

premier rend compte des moyennes des paramètres de pistes, le second des écarts types pour les mêmes données. Il existe ainsi un fichier pour les dinosaures sauropodes et un pour les dinosaures tridactyles, soit quatre fichiers par site.

Courtedoux-Béchat Bovais fait toutefois figure d'exception avec deux fichiers pour les seuls dinosaures sauropodes : faute de temps, les empreintes et les pistes de la couche 500, avec près de 150 pistes de tridactyles, n'ont en effet pu être mesurées. La couche 502, comportant une seule piste de tridactyle de six empreintes, n'est pour des raisons pratiques pas non plus représentée dans un fichier statistique particulier. Pour prendre connaissance des moyennes et des écarts types des paramètres mesurés de cette piste, il est possible de se référer au fichier des paramètres de pistes correspondant (voir les catalogues *Traces de dinosaures jurassiques*, liasses 2). À défaut d'être documentés sur le terrain, les paramètres des dix-sept pistes de sauropodes de la couche 500 ont été mesurés avec le logiciel Cadence toolset par Kent A. Stevens, selon le plan synoptique de surface (chap. 3.1) du site de Béchat Bovais pour calculer les paramètres d'empreintes et de pistes. Même si la méthode de mesure diffère, les fichiers paramètres sont intégrés au catalogue du site (pour les détails de cette méthodologie, voir Stevens & Ernst 2015).

6.1.6.1 Moyennes des paramètres de pistes de sauropodes et de tridactyles

Les fichiers statistiques des moyennes mettent en évidence la valeur médiane des paramètres mesurés, ceci pour chacune des pistes, classées par ordre croissant de couche puis de numéro de piste (fig. 89 et 90).

Les fichiers comportant les moyennes des paramètres sont conçus en trois parties distinctes. La première partie contient les données générales, la deuxième les paramètres issus des fichiers informatisés, soit les mesures des empreintes et des pistes. La troisième et dernière partie comporte les calculs relatifs à la vitesse de déplacement ainsi qu'à la configuration des pistes pour les sauropodes, et uniquement à la vitesse pour les pistes de tridactyles.

Les données générales de chacun des fichiers contiennent le numéro de couche, le nom de la piste, le numéro de secteur, ainsi que les informations relatives à la direction de la piste (entrée E, sortie S et directe D; chap. 6.3.4). La longueur des pistes ainsi que le nombre d'empreintes sont également indiqués. Les fichiers reprennent ensuite les moyennes des paramètres issues des fichiers informatisés (chap. 6.1.5).

Dans la partie réservée aux calculs, la hauteur à la hanche, notée hauteur Thulborn, est définie au moyen de la constante utilisée par cet auteur (Thulborn 1990). Elle permettra de calculer le rapport entre l'enjambée du pied (SL: *stride length*) et la hauteur à la hanche (h), noté enjambée (pes)/hauteur Thulborn, propre à la définition de l'allure des sauropodes et des tridactyles. Ce rapport a été défini par Alexander (1976) et est basé sur ses observations de vertébrés actuels (chap. 6.1.5).

SCR		Moyennes des paramètres des pistes de tridactyles												Calcul			
		Données générales		Mesures des empreintes						Mesures des pistes							
Train arrière	II	III	IV	Doigts	gauche	droite	gauche	droite	gauche	droite	gauche	droite	gauche	droite			
couche																	
piste																	
secteur																	
entrée (E)																	
sortie (S)																	
directe (D)																	
longueur de la piste																	
nombre d'empreintes																	
longueur																	
largeur																	
profondeur																	
longueur																	
largeur																	
longueur																	
largeur																	
longueur																	
divergence																	
divergence																	
rotation																	
rotation																	
griffe dII																	
griffe dIII																	
griffe dIV																	
griffe dII																	
griffe dIII																	
griffe dIV																	
enjambée (pes)																	
largeur de la piste																	
pas																	
progression																	
angle du pas																	
enjambée (manus)																	
largeur de la piste																	
pas																	
progression																	
angle du pas																	
distance gléno-acétabulaire																	
hauteur Thulborn																	
enjambée (pes)/hauteur Thulborn																	
vitesse Thulborn																	
vitesse Alexander																	
IPS																	
IMS																	
IPS/IMS																	
WAP/PL																	
WAM/MW																	
WAP/WAM																	
Calcul																	
Vitesse																	
Configuration de la piste																	
CRO		Moyennes des paramètres des pistes de saurodopes															
Données générales		Mesures des empreintes						Mesures des pistes									
Train arrière		Train avant		Train arrière		Train avant		Vitesse		Calcul							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		Configuration de la piste							
couche		secteur		entrée (E)		sortie (S)		directe (D)		largeur de la piste							
piste		longueur		longueur		largeur		longueur		nombre d'empreintes							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		longueur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche		droite		gauche		largeur							
gauche		droite		gauche													

Thulborn & Wade (1984) ont étendu aux dinosaures les observations d'Alexander (1976). Ils utilisent dans ce but le rapport enjambée/hauteur à la hanche (SL/h), soit la longueur relative de la foulée, pour définir trois allures différentes. Si le rapport SL/h est supérieur à 2,9, l'animal avait une allure rapide, la course ou le galop. S'il est inférieur à 2, il avait une allure lente, la marche. Entre 2,0 et 2,9, l'animal avait une allure intermédiaire, que les auteurs qualifient de trot (Alexander 1976 ; Thulborn 1990).

Dans la littérature consacrée à l'ichnologie des vertébrés, les pistes de sauropodes considérées comme étant le résultat de la course ou du galop d'un animal sont inexistantes (Thulborn 1989), et rares pour les tridactyles. Sur les sites de la Paléontologie A16, aucun sauropode n'atteint une valeur équivalente ou supérieure à 2 pour le rapport SL/h, ce qui signifie que tous sans exception avaient une allure de marche. Toujours selon Thulborn (1990), cela ne signifie pas pour autant que les sauropodes n'étaient pas capables d'atteindre une allure plus rapide, mais que de telles pistes n'ont peut-être pas encore été découvertes, les sauropodes ne devant utiliser que rarement ce type d'allure. Il démontre de plus que les dinosaures bipèdes marchaient avec de longues enjambées, alors que les quadrupèdes se déplaçaient avec des enjambées plus courtes, donc avec un rapport SL/h plus petit (0,95 de moyenne) que pour les tridactyles (1,29 de moyenne). Ce constat semble se vérifier par l'observation des données de la Paléontologie A16. Thulborn explique en partie cela par le fait que les dinosaures quadrupèdes ont les membres antérieurs et postérieurs de longueur inégale, impliquant un rapport SL/h différent pour les pattes avant et les pattes arrière. Si cela devait rester possible pour les sauropodes de coordonner leurs mouvements à enjambée et donc à vitesse réduite, cela n'était probablement plus le cas avec des enjambées et donc une vitesse plus importantes. Les quadrupèdes étaient donc vraisemblablement, selon Thulborn, limités dans leur vitesse pour des raisons mécaniques.

Pour les tridactyles, sur 256 pistes prises en compte sur un total de 409 sur les sites de l'A16, 99 ont un rapport SL/h entre 2,1 et 2,9 donc une allure que l'on peut qualifier de trot, et 19 un rapport SL/h $\geq 2,9$, avec une allure de course ou de galop. La longueur réduite des pistes concernées (3 à 6 empreintes) induit une certaine prudence dans l'interprétation des chiffres. En plus du fait que cette méthode ne donne que des estimations de l'allure des animaux, elle ne permet pas de mettre en évidence la vitesse maximale des dinosaures par exemple. Pour une évaluation critique de la méthode, voir Rainforth & Manzzella (2007).

Dans les fichiers statistiques des moyennes des paramètres suivent deux colonnes indiquant les vitesses estimées d'après les différentes études d'Alexander (1976) et de Thulborn (1989). Si l'équation utilisée par les deux auteurs est la même, les valeurs de la vitesse varient suite à l'utilisation de constantes différentes pour la définition de la hauteur à la hanche des animaux (chap. 6.1.5).

Configuration des pistes de sauropodes

Dans les fichiers relatifs aux moyennes des sauropodes, différents ratios concernant la configuration des pistes ont été insérés. Ceux-ci tentent notamment d'expliquer la largeur des pistes, ainsi que le degré d'hétéropodie de chacune d'elles. Selon certains auteurs, les différents types de sauropodes ont un rapport de proportion entre les empreintes de pieds et les empreintes de mains distincts, ce qui pourrait permettre d'identifier de manière plus précise les dinosaures ayant laissé leurs empreintes (p. ex. Lockley et al. 1994). Dans les fichiers des moyennes, le degré d'hétéropodie est indiqué, de manière approximative, par le rapport IPS/IMS (Marty 2008). Les paramètres de l'IPS, *index of pes track size* (indice de la taille de l'empreinte du pied) et celui de l'IMS, *index of manus track size* (indice de la taille de l'empreinte de la main), ont été développés par Thulborn (p. ex. 1990). Il définit un indice de la taille de l'empreinte (SI: *index of track size*), qui selon lui est moins variable au sein d'une même piste que la longueur ou la largeur de l'empreinte de pied. Il constate que la longueur du pied est le paramètre le moins fiable pour définir la taille réelle de l'empreinte, cette donnée étant couramment affectée par l'angle avec lequel le pied entre et quitte le substrat ainsi que par le développement de caractéristiques extramorphologiques comme les marques de traînées ou de glissement par exemple. Malgré cela, c'est la longueur du pied qui est le paramètre les plus utilisé en ichnologie pour estimer la taille des dinosaures, et par extrapolation, leur allure et leur vitesse. D'où la nécessité de mesurer ce paramètre avec précaution, uniquement pour les empreintes les mieux préservées. Sur les sites de l'autoroute A16, les valeurs considérées comme peu fiables ont été systématiquement écartées des moyennes des paramètres mesurés (chap. 6.1.4 et 6.1.5).

L'indice de la taille de l'empreinte SI a été utilisé pour la première fois par Thulborn et Wade (1984) sur des pistes d'ornithopodes des sites de Seymour et Lark Quarry (Queensland, Australie), et a démontré un grand degré de cohérence au sein de chaque piste. Selon les auteurs, il semble très utile pour comparer la taille relative de deux individus ou plus.

L'indice de Thulborn peut être défini pour les empreintes de pieds et de main. Ici aussi, seules les empreintes bien préservées, qui ne sont pas altérées par une éventuelle surimpression par d'autres empreintes, devraient être prises en compte.

Thulborn définit cet indice de la manière suivante :

$$\text{Indice de la taille de l'empreinte (SI: } \text{index of track size}) = (\text{longueur} \times \text{largeur})^{0,5}$$

$$\text{Indice de la taille du pied (IPS: } \text{index of pes track size}) = (\text{PL} \times \text{PW})^{0,5}$$

$$\text{Indice de la taille de la main (IMS: } \text{index of manus track size}) = (\text{ML} \times \text{MW})^{0,5}$$

où :

PL (*pes length*) = longueur du pied

ML (*manus length*) = longueur de la main

PW (*pes width*) = largeur du pied

MW (*manus width*) = largeur de la main.

Dans leurs recherches, Lockley et al. (1994) examinent la possibilité de définir des ichnotaxons en prenant en compte plusieurs types de paramètres, dont le degré d'hétéropodie, ainsi que la largeur des pistes. Selon eux, ces caractéristiques, en conjonction avec d'autres facteurs comme la forme des empreintes, l'impression des doigts et/ou des griffes, etc., pourraient permettre de déterminer la gamme des variations morphologiques présentes au sein des pistes de sauropodes.

Comme déjà évoqué dans le chapitre 6.1.4, Farlow (1992) a défini deux types de largeurs pour distinguer différents groupes de sauropodes, des pistes étroites (*narrow-gauge*) et des pistes larges (*wide-gauge*). Afin de préciser cette typologie, un troisième type d'écartement de piste, qualifié de moyen (*medium-gauge*) a été défini par Lockley et al. (1994) et Meyer et al. (1994).

Cependant, la littérature ichnologique a actuellement plutôt tendance à démontrer que la largeur des pistes n'est pas un facteur pertinent pour définir des ichnotaxons, la largeur de voie pouvant évoluer chez un même groupe de sauropodes durant l'ontogénie (Lockley et al. 2002), et des pistes de dinosaures ayant été identifiées avec des changements de largeur au sein d'une même voie (Marty et al. 2010; Castanera et al. 2012). Ce type de données reste cependant intéressant pour comparer les différentes pistes entre elles (Romano et al. 2007) et tenter de comprendre la démarche des dinosaures, en étudiant les changements intervenant au sein d'une même piste (Stevens et al. 2016).

Ainsi, et malgré le fait que la pertinence de la notion de largeur de voie pour différencier les sauropodes soit débattue, Romano et al. (2007) ont introduit le concept de «ratio de piste» (PTR: *pes trackway ratio*), pour les empreintes de pieds) pour permettre une identification plus précise de la largeur des pistes de dinosaures quadrupèdes, ainsi qu'une meilleure comparaison entre les pistes. Celui-ci correspond au rapport entre la largeur de l'empreinte telle qu'exprimée sur la figure 80 (SW) et la largeur totale de la piste (OW), qui coïncide avec la distance comprise entre la largeur extérieure du pied gauche et celle du pied droit. Cela signifie qu'avec cette méthode de mesure, la largeur SW mesurée ne correspond pas à la largeur réelle de l'empreinte, sauf dans les cas où les empreintes sont parallèles à l'axe de la piste. Ce même ratio peut être utilisé pour les mains, et permet de comparer la largeur de voie des empreintes de pieds avec celle des mains, définissant ainsi différentes configurations de pistes. Selon Romano (2007), le ratio défini par les pieds peut varier à l'intérieur d'une même piste, de telle sorte que des segments de la piste peuvent être qualifiés de «larges», d'autres d'«étroits».

La méthode utilisée par Romano a, selon D. Marty (2008), plusieurs limites. Premièrement, Romano n'a pas clairement défini si la largeur de la piste est à considérer en prenant en compte la ligne intérieure ou la ligne extérieure des empreintes. Cela peut influencer sensiblement la largeur de la piste, particulièrement dans les cas où les empreintes ont de grands bourrelets de déplacement.

Deuxièmement, cette méthode a comme inconvénient le fait que la largeur des empreintes telle qu'elle est mesurée dépend fortement de leur rotation: plus la rotation des pieds vers l'extérieur est importante, plus la largeur de l'empreinte sera grande (fig. 80). Une piste avec une rotation des pieds prononcée apparaîtra plus étroite que si on la compare à la même piste avec une rotation des pieds moins prononcée (Marty 2008).

Troisièmement enfin, le ratio de Romano est relativement difficile à mesurer, et n'est pas utilisable sur le terrain pour de longues pistes.

C'est pourquoi dans sa thèse de doctorat, D. Marty (2008) a introduit de manière additionnelle au rapport de piste PTR le ratio WAP/PL, qui est le rapport entre la largeur de la piste (WAP) et la longueur du pied (PL) afin de caractériser la largeur des pistes (fig. 80). Ce nouveau ratio n'est quant à lui pas influencé par l'orientation des pieds.

Si Marty (2008) compare le ratio WAP/PL avec le PTR pour tenter d'établir un lien entre eux et caractériser la largeur des pistes de sauropodes, dans les fichiers statistiques de la Paléontologie A16, seule la méthode du ratio WAP/PL a été retenue. Ce même ratio a été utilisé pour définir la largeur de piste des mains (WAM/MW).

Le rapport entre les deux, noté WAP/WAM dans les fichiers, a ensuite été utilisé pour définir si les empreintes de main sont plus ou moins proches de la ligne médiane de la piste que les empreintes de pieds. Selon Marty (2008), cette comparaison peut s'avérer utile pour caractériser la configuration des pistes. De plus, elle pourrait aider à comprendre la démarche d'un individu au sein d'une même piste, en mettant en évidence les éventuels changements dans les virages par exemple.

6.1.6.2 Écarts types des paramètres de pistes

Le calcul de la moyenne étant sensible aux valeurs extrêmes, un fichier contenant les écarts types a également été à chaque fois réalisé, permettant de mettre en évidence les éventuelles valeurs singulières, voire erronées (fig. 91 et 92).

L'intégralité des données relatives aux écarts types est retranscrite d'après les fichiers des paramètres de pistes. Pour le détail des paramètres d'empreintes et de pistes documentés, se référer aux chapitres 6.1.4 et 6.1.5.

Les écarts types des différents paramètres ont été intégrés aux fichiers afin d'évaluer la précision des données mesurées. L'écart type chiffre l'écart existant entre les différentes valeurs et la moyenne de celles-ci. Si la valeur de l'écart type est élevée, cela peut signaler une valeur singulière, voire inexacte. Cependant, les écarts types n'ont pas donné lieu à des interprétations de la part de la Paléontologie A16. À noter que l'intégralité des paramètres de pistes ont été compilés dans une base de données permettant leur mise en évidence selon des critères prédéfinis souhaités.

CRO	Données générales		Mesures des empreintes												Mesures des pistes												
			Train arrière						Train avant						Train arrière						Train avant						
			gauche			droite			gauche			droite			gauche			droite			gauche			droite			
500	S1	3	321	o	324	326	186	28	177	177	177	177	177	177	25	38	18	21	12	12	12	12	12	12	12	12	12
500	S2	3	56	o	58	58	19	19	19	19	19	19	19	19	24	24	24	24	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5
500	S20	3	60	o	62	62	42	42	42	42	42	42	42	42	24	24	24	24	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5
500	S3	3	78	o	84	84	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	24	24	24	24	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5
500	S4	1	30	o	27	27	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	S5	1	16	o	22	22	19	19	19	19	19	19	19	19	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	S6	1	8	o	11	11	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	8010501	2	19	o	25	25	19	19	19	19	19	19	19	19	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	8010501	2	29	o	35	35	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	8010501	2	35	o	42	42	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	8010501	2	56	o	66	66	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	8010501	2	76	o	84	84	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	8010501	2	107	o	120	120	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	S1	2	283	o	283	283	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	S14	2	280	o	280	280	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
500	S15	17	40	o	38	39	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
510	S1	2	292	o	337	306	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
510	S1	3	251	o	247	249	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
510	S2	3	142	o	158	148	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	10	25	10	12	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
515	S1	1	9	o	5	2.5	5	2.5	5	2.5	5	2.5	5	2.5	10	14	10	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
515	S2	1	227	o	229	229	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	10	14	10	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
520	S1	2	330	o	330	330	1.4	3	3	3	3	3	3	3	10	14	10	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
520	S1	3	344	o	346	346	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	10	14	10	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
520	S2	3	244	o	244	244	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	10	14	10	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
530	S1	3	210	o	212	209	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	10	14	10	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
530	S2	3	84	o	81	82	4.9	5	5	5	5	5	5	5	10	14	10	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
540	S1	2	257	o	251	251	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	10	14	10	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
540	S1	18	355	o	356	356	10.2	9	3.5	1.8	0.3	0.5	0.7	0.5	10	14	10	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fig. 91. Exemple de fichier statistique d'écart types des paramètres des pistes de sauropodes.

SCR	Données générales		Mesures des empreintes												Mesures des pistes												
			Train arrière						Train avant						Doigts						Doigts						
			gauche			droite			gauche			droite			gauche			droite			gauche			droite			
1000	T18	2	166	o	170	168	11.1	4	1.0	0.3	2.1	0.6	0.6	1.9	0.3	13	17	9	3	3	3	10	2	2	2	2	2
1000	T19	2	327	o	327	327	4.3	4	0.9	0.2	2.5	0.4	0.4	1.4	0.3	14	16	16	0	0	0	10	5	6	4.5	3.6	3.4
1000	T20	2	121	o	114	118	6.5	5	1.7	0.8	2.3	1.1	0.6	0.5	1.2	0.9	1.0	1.4	0.3	0.4	0.0	11.6	6	5	6	4.5	3.6
1000	T23	18	178	o	169	183	6.4	5	1.7	0.8	2.3	1.1	0.6	0.5	1.2	0.9	1.0	1.4	0.3	0.4	0.0	11.6	6	5	6	4.5	3.6
1055	T2	102	349	o	359	355	23.1	15	1.9	0.5	2.5	0.5	0.5	1.4	0.3	14	16	16	0	0	0	10	2	2	2	2	2
1055	T3	102	17	349	o	349	349	173	173	173	173	173	173	173	173	10	14	16	0	0	0	11.6	6	5	6	4.5	3.6
1500	T12	17	17	o	17	17	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	10	14	16	0	0	0	11.6	6	5	6	4.5	3.6	
1500	T13	17	327	o	327	327	11.5	4	1.1	0.8	2.2	0.2	0.2	1.4	0.3	14	16	16	0	0	0	11.6	6	5	6	4.5	3.6
1500	T14	17	349	o	349	349	4.6	5	0.5	0.3	1.3	0.3	0.3	1.2	0.3	14	16	16	0	0	0	11.6	6	5	6	4.5	3.6
1500	T15	17	199	o	200	200	2.9	4	1.5	1.2	2.2	0.2	0.2	0.8	0.2	12	18	9	3	3	3	3.6	2	2	2	2	2
1500	T16	17	326	o	326	326	11.5	4	1.1	0.8	2.2	0.2	0.2	1.4	0.3	14	16	16	0</								

6.1.7 Paramètres de pistes: base de données

Les données mesurées sur le terrain par la Paléontologie A16 durant les années de fouille des sites à traces de dinosaures sont une précieuse source d'informations pour l'ichnologie. Afin de permettre un éventuel échange de données avec d'autres chercheurs, toutes les mesures transcris dans les fichiers paramètres informatisés ont été compilées dans une base de données. Deux versions ont été réalisées: une pour les pistes de saurodactyles et une pour les pistes de tridactyles.

Les fichiers de la base de données ont été conçus au moyen du logiciel Excel, et peuvent être affichés en français ou en anglais. Ils possèdent chacun quatre feuilles visibles: requêtes, formules, moyennes et écarts types. Si nécessaire, des onglets masqués permettent la modification des bandeaux (*Comment changer les entêtes?*, voir ci-dessous). Sur chacune des feuilles, des commentaires s'affichent aux endroits stratégiques pour résumer les points principaux du mode d'emploi (fig. 93-95).

Avertissement

Afin d'activer les fonctionnalités de la base de données, il est indispensable d'accepter les Macros lors de l'ouverture du classeur Excel. En outre, en raison des procédures de codification utilisées, l'ajout ou la suppression de colonnes dans les différents onglets de la base de données risque d'introduire des résultats improbables. Enfin, le code source étant accessible dans le module de fichiers, la prudence est recommandée lors de sa manipulation ou de sa modification.

Mode d'emploi

Lors de l'ouverture du fichier, le curseur se positionne sur l'onglet requêtes qui permet de sélectionner des données grâce à son filtre intégré. Cette feuille contient toutes les mesures de terrain relatives aux empreintes et aux pistes (chap. 6.1.4 et 6.1.5). À noter que quatre champs relatifs à l'estimation de l'orientation des pistes (déviation E-S, moyenne ES, moyenne ES-D, orientation) ont d'abord été établis. Ils ont été abandonnés au profit d'une nouvelle dénomination des colonnes (angle d'entrée, angle de sortie, ligne directe). Pour des raisons pratiques, ils n'ont pas été supprimés, mais restent masqués dans les fichiers (colonnes K, L, M, N). Ces données ne sont pas à utiliser.

Sur le bandeau de cette feuille figurent plusieurs boutons. Un premier choix permet d'afficher les données, soit en français, soit en anglais. Le bouton intitulé *forme* affiche le formulaire *outils utiles!*, dont les options sont accessibles grâce à une liste déroulante. Une fois le menu choisi, il est indispensable, sur un ordinateur Macintosh, de refermer le formulaire, qui est obligatoirement modal, pour pouvoir revenir à la feuille Excel.

Options de la liste déroulante:

- le menu *afficher tous les entêtes* est lié à *masquer les colonnes avec étoiles*(*). Le premier menu affiche les champs relevant toutes les valeurs mesurées, y compris celles considérées comme peu pertinentes en raison d'une mauvaise préserva-

tion des empreintes, de la présence de failles, etc. Le second menu masque les colonnes à l'intitulé identique, additionné d'un astérisque, qui comporte les valeurs estimées, considérées comme peu pertinentes; *masquer les colonnes avec étoiles*(*) revient donc à n'afficher que les valeurs fiables. Seules ces valeurs sont utilisées pour les différents calculs et moyennes prenant en compte les paramètres d'empreintes et de pistes dans les fichiers statistiques des catalogues du patrimoine paléontologique jurassien.

– *Retire tous les filtres* revient à supprimer la sélection pour revenir au fichier de base.

– *Comment changer les entêtes?* active les feuilles permettant de modifier les intitulés du bandeau de la base de données, les commentaires ainsi que les fonctions du bloc *formules*. En cas de rectification, il est indispensable de répercuter les changements dans la version en français (FR) et celle en anglais (EN), ainsi que dans tous les onglets de référence: *ReqEN*, *ReqFR*, *FormEN*, *FormFR*, *MoyEN*, *MoyFR*, *EcartEN*, *EcartFR*. L'onglet d'initialisation (*Init.*) permet quant à lui de changer les remarques inhérentes à la base de données.

Afin de mémoriser les modifications réalisées, il est indispensable, tant sur un ordinateur Macintosh que sur un ordinateur PC, de revenir à l'onglet *requêtes* et de modifier la langue courante à deux reprises pour rejoindre l'idiome préférentiel.

Pour transformer la cosmétique des fichiers (hauteur et largeur des colonnes, taille des caractères, etc.), il est possible d'opérer directement dans les quatre onglets de la base de données.

L'onglet *formules* affiche, pour une piste donnée, les paramètres d'empreintes et de pistes ainsi que les différents calculs statistiques liés. La hauteur à la hanche ainsi que la vitesse des dinosaures s'affichent ici selon trois auteurs différents. Dans les fichiers paramètres cependant, seules les références à Alexander et à Thulborn ont été conservées, les ressources bibliographiques relatives au troisième (Irby) étant lacunaires. Pour des raisons pratiques, cette référence n'a pas été supprimée de la base de données: les informations y relatives sont à considérer uniquement comme indicatives.

Si le message « Requête improbable... » s'affiche, cliquer sur le bouton « OK » pour revenir à la feuille *requête*. Sélectionner un seul site, une seule couche, une seule piste et un seul secteur pour obtenir une seule trajectoire de piste, puis retourner à la feuille *formules* pour l'affichage des données.

La case à cocher bleue affiche les *valeurs mesurées* qui sont prises en compte dans les moyennes du fichier. La case à cocher magenta y ajoute les valeurs estimées, qui s'affichent surlignées en rouge dans le fichier. Il s'agit de données mesurées sur le terrain mais qui ne sont pas assez fiables pour être utilisées dans le calcul des moyennes, parce que les empreintes sont mal préservées, peu visibles ou incomplètes, ou que les paramètres de pistes sont liés à des empreintes peu visibles, voire absentes. Le bouton *valeurs mesurées et estimées* permet d'en tenir compte, si besoin, dans les moyennes. Même si elles restent approximatives, ces données ne sont pas dénuées d'intérêt: elles permettent par exemple d'afficher une donnée indicative (hauteur à la hanche, vitesse du dinosaure, etc.) en l'absence de toute autre mesure pertinente.

Fig. 93. Extrait de l'onglet Requêtes de la base de données tridactyles.

Fig. 94. Extrait de l'onglet Formules de la base de données sauropodés.

Fig. 95. Extrait de l'onglet Moyennes de la base de données tridactyles.

Les onglets *moyennes* et *écart types* (chap. 6.1.6) comprennent un bouton *mise à jour*, utile en cas de modification des valeurs insérées dans la feuille *requêtes*. Dans ce cas, les macros calculent les moyennes et les écarts types à partir des nouvelles données de la feuille *requêtes*.

Une fois l'opération ammorcée, seul un léger changement de la forme du curseur indique que le travail, pouvant durer plus d'une minute, est en cours. Un message d'information s'affiche lorsque l'action est terminée.

Comme dans la feuille *formules*, un filtre permet de différencier les valeurs utilisées pour les moyennes des paramètres (lignes blanches) de celles qui ne sont pas considérées comme totalement pertinentes (lignes grisées).

6.1.8 Description et mesure des paramètres des empreintes isolées et des traces énigmatiques

Pour sauvegarder le maximum d'informations concernant les empreintes découvertes sur les sites le long du tracé de la Transjurane, une documentation exhaustive a été réalisée. La priorité a été mise sur les successions d'empreintes formant des pistes. Cependant, une quantité non négligeable d'empreintes ne pouvant être attribuées à des pistes ont été nommées *empreintes isolées*. Pour rappel, il s'agit pour l'essentiel des cinq catégories définies (chap. 6.1.2) :

- empreinte isolée s'apparentant à une empreinte de dinosaure de manière assez explicite mais n'appartenant pas ou de manière peu claire à une piste ;
- empreinte isolée ne correspondant pas à un dinosaure mais à un autre individu identifié ou supposé ;
- empreinte non identifiée ;
- empreinte liée à un phénomène sédimentologique identifié ou supposé ;
- toute autre empreinte ou structure non identifiée.

La nomenclature utilisée pour les empreintes isolées ne tient pas compte des cinq types identifiés, chacun étant défini par la même abréviation **E** pour *empreinte isolée*, suivie d'un numéro. Dans la documentation de terrain, la distinction entre ces différents types est apportée lors de la description de l'empreinte.

L'abréviation **TE** pour *trace énigmatique*, suivie d'un numéro, a parfois été utilisée pour nommer une structure d'origine biologique ou sédimentaire indéfinie ne ressemblant clairement pas à une empreinte de dinosaure. Mais ce terme n'a pas été utilisé de manière systématique (Marty 2008).

Les empreintes isolées et les traces énigmatiques ont été documentées sur les différents sites uniquement si le temps à disposition le permettait, une fois achevée la documentation de base. Comme pour les empreintes de pistes, la documentation consiste à nommer, mesurer, décrire, photographier et dessiner chaque empreinte isolée. Au contraire des premières

opérations qui n'ont pas toujours été effectuées de manière systématique, chaque empreinte isolée, numérotée ou non, apparaît sur le plan synoptique de surface correspondant, leur relevé dessin ayant été réalisé en même temps que celui des empreintes de pistes. Ce travail de documentation a été jugé utile pour permettre, à plus long terme, une interprétation des couches.

6.1.8.1 Techniques de documentation de terrain

La documentation des empreintes isolées et des traces énigmatiques implique plusieurs opérations, retranscrites à la main sur une fiche (fig. 96). La numérotation des empreintes isolées recommence à E1 pour chaque nouvelle couche fouillée de manière continue d'un secteur à l'autre.

Sur chacune des fiches de terrain, le code du site, l'année en cours, le numéro de secteur et celui de la couche concernée sont renseignés dans le bandeau supérieur. Chaque ligne correspond ensuite à une empreinte isolée, qui est mesurée et décrite ; les numéros des empreintes isolées sont spécifiés dans la première colonne, dans l'ordre croissant. Si une empreinte ou une contre-empreinte a été prélevée, son numéro sera inscrit dans la colonne suivante ; si un moulage ou un monofilm a été réalisé, son numéro de relevé sera également indiqué. Viennent ensuite les coordonnées locales (x ; y), mesurées d'après le carroyage de terrain. La position z n'est pas renseignée puisque chaque empreinte est située sur une couche identifiée.

La longueur, la largeur et la profondeur des empreintes isolées sont mesurées de manière identique aux empreintes de pistes (fig. 77 et 84). Il en est de même pour les angles de divergence des empreintes isolées de tridactyles mais, comme elles n'appartiennent pas à une piste, il est difficile de fixer avec certitude leur appartenance à des pieds gauches ou droits. Pour faciliter la mesure des angles de divergence entre les doigts des empreintes isolées de tridactyles, il a été décidé d'attribuer, par principe, ces empreintes à des pieds droits afin de toujours procéder dans le même ordre, en commençant par la mesure de l'angle de divergence gauche, puis celle de l'angle de divergence droit. Cette règle n'a pas été appliquée si l'empreinte était clairement attribuable à un pied gauche.

L'orientation de l'empreinte par rapport au nord est indiquée dans la colonne *direction*, puis un croquis rapide de l'empreinte ou de la structure est réalisé afin d'avoir une idée générale de sa forme.

La description détaillée d'une empreinte isolée comprend en général les informations suivantes : le genre d'empreinte (saurropode, théropode, figure sédimentaire, structure indéterminée) avec, si possible, la détermination de son anatomie (pied, main), son degré de visibilité (bien à légèrement visible) et de profondeur (très à peu profonde), son état de préservation (bien à mal définie) et l'état de conservation de la surface (fracturée, lessivée, failles). La présence de bourrelets, de détails anatomiques et de griffes est aussi spécifiée, ainsi que tout élément particulier utile.

Site	BSY	Année	2008	Sct	20	Cou	1040	Documentation des empreintes	Page	27							
n° empreinte	n° Prélèvement	n° Prélèvement de la Contre-E	n° Relevés	Position x	Position y	Position z	Longueur (cm)	Largueur (cm)	Profondeur (cm)	Divergence II-III (degrés)	Divergence III-IV (degrés)	Direction	Croquis	Description détaillée	Fait partie d'une piste avec les empreintes suivantes	Nom	Date
E235				55,76	15,36		3,5	6	0,7	X	X	↓		E. main bébé S., visible moy. prof. à gauche, peu prof à droite et mal définie à droite		MJ MC	08 28
E236				57,93	16,66		10	6,5	0,8	X	X	↓		E. pied bébé S., visible assez prof. à l'avant, moins bien définie à l'arrière, surface irrégulière	S25 ?	u	u
E237				57,88	16,33		13	11	0,6	X	X	↓		E. pied bébé S., visible à l'avant, peu visible à l'arrière, moy. prof. à l'avant, bourrelet visible à l'avant		u	u
E238				55,56	18,65		13	8	0,4	X	X	←		E. pied bébé S., visible peu prof., + prof. à l'avant, détails anatomiques visibles, bourrelet lég. visible à droite, érosion E sans num.	E239	u	u
E239				55,49	18,52		4	7	0,7	X	X	←		E. main bébé S., visible, moy. prof. + prof. à droite, bourrelet visible sur tout l'avant surface irrégulière	E238	u	u
E240				45,28	9,57		X	X	0,9	3	X	→		E. pied T., visible, assez prof. seuls II et III visibles, II + prof. que III, E. érosée par S2-LM18		u	u
E241				29,32	5,84		45	(40)	(1,1)	X	X	→		E. pied S., visible moy. prof. mais l'ond arraché, partie droite coupée par faille et arraché, bourrelet visible à l'avant droit		u	u
E242				31,68	9,94		(45)	(28)	1,5	X	X	←		E. pied S. visible, moy. prof. à l'avant (peu prof) à l'arrière, avant l'arbit coupé par une faille, bourrelet lég. visible à gauche mais abîmé		u	u
E243				51,05	3,87		11,5	7	0,5	X	X	↓		E. pied bébé S., visible, peu prof un peu + prof. à l'avant où il y a les détails anatom. E colle à S2-RM14, surf. irrégul.		u	u

Fig. 96. Exemple de fiche de documentation de terrain pour les empreintes isolées.

Une colonne de la fiche est réservée pour indiquer si l'empreinte isolée a été attribuée à une piste ou semble en faire partie. Si tel est le cas, les empreintes faisant partie de la même piste y sont spécifiées (fig. 96). Enfin, les initiales des intervenants et la date des opérations sont aussi mentionnées.

Le modèle de fiche pour la documentation des empreintes isolées a évolué au fil du temps, n'ayant pas toujours été aussi complet. Dans les premières années de fouille, certaines informations comme le numéro de prélèvement ou de relevé, les divergences pour les empreintes de tridactyles, la direction et les croquis n'y figuraient pas. Les coordonnées locales avaient déjà une colonne réservée dans le premier modèle de fiches, mais elles n'ont pas été systématiquement relevées.

6.1.8.2 Traitement des données

Toutes les données ont donc été récoltées sur le terrain entre 2002 et 2011 mais pas toujours de manière très homogène. Sur certains sites fouillés, les empreintes ont toutes été numérotées en tant qu'empreintes isolées, sans autre distinction; sur d'autres, elles ne l'ont pas du tout été faute de temps. Elles ont parfois aussi été décrites de manière plus lacunaire et moins précise, surtout dans les premières années de fouille. Il est arrivé que des empreintes isolées soient finalement attribuées à une piste et troquent ainsi leur numéro d'empreinte isolée contre un numéro de piste.

Pour obtenir des données cohérentes sur l'ensemble des sites fouillés, les empreintes isolées ont donc été reprises une à une pour être analysées et identifiées d'après les descriptions, les photographies et les plans. Elles ont ainsi été réparties en catégories, répertoriées dans les tableaux des fiches en rapport avec les empreintes isolées. Les deux catégories principales et leurs sous-catégories concernent les empreintes attribuées à des dinosaures et les structures indéterminées qui peuvent y être liées :

a) empreintes isolées de dinosaures:

- empreinte de pied de saurodrome
- empreinte de main de saurodrome
- empreinte indéterminée de saurodrome (pied ou main)
- empreinte de pied de tridactyle
- empreinte de dinosaure indéterminé;

b) structures indéterminées:

- trace énigmatique (TE)
- structure indéterminée.

Le recomptage des empreintes isolées s'est fait de manière identique pour chacun des sites, en parallèle du contrôle global de la documentation, de façon à rendre les données cohérentes entre les différents sites et couches. Les critères observés pour consi-

dérer une empreinte isolée comme une potentielle empreinte de dinosaure sont les suivants :

- forme de l'empreinte : s'apparente ou non à une empreinte de dinosaure ;
- altération ou empreinte : certaines structures, pouvant ressembler à des empreintes, semblent plutôt liées à l'altération et au lessivage récents (souvent à proximité des failles et des bordures de couches, autour des anciennes racines) ; elles ne sont pas considérées comme des empreintes de dinosaures ;
- visibilité de l'empreinte : souvenirs du terrain, dessins, photographies, orthophotographies, etc. ;
- position de l'empreinte : se trouve dans l'alignement d'une piste, par exemple.

Dans les tableaux des fiches *couches* et des fiches *sites* intégrées aux catalogues par site, n'ont été comptabilisées que les empreintes isolées pouvant être attribuées à un dinosaure. Les traces énigmatiques et les structures indéterminées, qui ne sont pas considérées comme des empreintes de dinosaures en tant que telles, sont donc exclues de ce décompte. Le détail de ces structures indéterminées n'apparaît que dans les tableaux des fiches *empreintes isolées*, réparties dans les deux dernières colonnes de droite, séparées des empreintes isolées de dinosaures.

Les tableaux des fiches *empreintes isolées* reprennent les informations des fiches remplies sur le terrain afin d'en avoir, couche par couche, une vue globale rapide (fig. 97). Les premières colonnes de ce tableau renseignent sur la couche et le secteur. Ensuite,

Couche	Secteur	N°	Ancien nom	Empreinte de piste correspondante	Empreintes isolées numérotées								Structures indét. (non comptabilisées)					
					long.	larg.	prof.	position	position	Saupodope			Tridactyle	Dinosaure indét.	Trace énigmat.	Indét. (TE)		
										cm	cm	cm	x	y	pied	main	indét.	
1000	12		E1	T12 R13	18	–	1,6	19,14	24,55					x				
			E2	T12 L14	20,5	9	1	18,73	23,70					x				
			E3	T12 R14	20	10,5	0,6	18,50	22,76					x				
			E4	T12 L15	17,5	9	1,5	17,98	21,87					x				
			E5		33,7	23	1,5	17,50	23,46	x								
			E6		10,2	23	1,9	18,37	23,75		x							
			E7		9,2	26,5	1,8	17,90	24,67		x							
			E8		43,5	28	0,3	19,09	23,96	x								
			E9	T10 L1	18	9	0,9	21,00	21,86					x				
			E10		39	29,5	1,5	22,35	20,23	x								
			E11		11,5	21,5	2,4	22,67	19,67		x							
			E12		7,5	21	3,3	21,23	19,37		x							
			E13		(21)	10,5	1	24,25	26,36					x				
			E14	T11 L2	(20)	(15)	1	27,80	29,20					x				
			E15	T11 R2	20	12	1,2	26,73	29,79					x				
			E16		45	33	2,4	27,40	31,20					x				
			E17		47	30	2,4	27,30	32,05					x				
			E18		21,5	–	1,3	25,40	30,79					x				
			E19		(37,5)	27,5	1,3	23,00	31,20					x				
			E20		5,2	12,7	0,8	27,97	39,34	x?								
			E21		21	13,5	0,8	27,72	39,25	x?								
			E22		13	7	0,7	25,55	40,57					x				
			E23		15	23,7	1,8	17,07	41,00	x?								
			E24		(17,3)	18,1	2,2	12,07	39,88	x								
			E25		6	12,8	0,8	11,94	40,05		x							
			E26		10,4	25,3	2,8	9,91	38,94	x?								
			E27		32	24	1,7	11,84	43,23	x								
			E28		20,2	14	1,3	10,70	44,77		x							
			E29		45,8	37,2	3	6,00	44,05	x?								
			E30		76	50	3,2	5,10	44,67					x				
			E31		17	9,5	1,5	4,30	45,10					x				
			E32		18	25,5	2	-0,50	36,00	x								
			E33		21	11,5	1	-2,56	32,00					x				
26								17		8		1						
								26										
								102										
								128										

Fig. 97. Exemple d'un tableau figurant sur les fiches des empreintes isolées.

chaque ligne se rapporte à une empreinte isolée numérotée. La colonne *ancien nom* fait référence à une empreinte isolée numérotée rattachée, par la suite, à une piste et qui a ainsi pris le nom de l'empreinte de piste. Cette empreinte sera alors comptabilisée dans le nombre d'empreintes de la piste concernée et non comme empreinte isolée. Les informations suivantes du tableau comprennent les mesures des empreintes et les coordonnées locales.

Sur certaines couches, des empreintes isolées ont été observées et dessinées, mais pas numérotées. Aucune autre information n'a été récoltée, et elles ne sont ni décrisées ni mesurées. Ces empreintes ont été évaluées une fois les fouilles achevées d'après les dessins et les photographies. Celles considérées comme des empreintes de dinosaures ont été comptabilisées, et leur nombre total figure dans le bas du tableau des fiches *empreintes isolées* sur la ligne intitulée *empreintes isolées non numérotées*. Pour le site de Courtedoux-Béchat Bovais, les empreintes isolées n'ont pas toutes été numérotées, par manque de temps.

6.1.8.3 Dénomination et numérotation des empreintes isolées

Pour faciliter la documentation et la distinction des différentes empreintes, des standards de numérotation ont été définis (chap. 6.1.2). Durant les premières années de fouille, ces standards ne sont pas clairement établis et les appellations ne sont pas toujours attribuées de manière homogène. Les empreintes isolées sont parfois désignées par la lettre **T** ou les lettres **Tr** pour *trace*. Cette désignation a vite été abandonnée au profit de la lettre **E** pour *empreinte isolée*, en raison de l'attribution plus justifiée de la lettre **T** aux pistes de *théropodes*. La documentation des empreintes concernées a été révisée par la suite, mais les photographies de terrain conservent bien entendu les anciennes nomenclatures.

Comme expliqué ci-dessus, chaque empreinte ne pouvant être rattachée à une piste et chaque structure particulière reçoivent un numéro qui accompagne la lettre **E**, afin de les différencier lors de la documentation. Dans l'idéal et pour éviter toute confusion, chaque empreinte isolée devrait recevoir un numéro propre par site et par couche, indépendamment du secteur dans lequel elle a été découverte. Plusieurs exceptions ont toutefois été observées et sont explicitées ci-dessous.

6.1.8.4 Cas particuliers

Doublons de numéros d'empreintes isolées

Sur la plupart des sites, les fouilles ont été effectuées par étapes, en plusieurs années. Certains sites étaient parfois rebouchés pour être protégés durant la mauvaise saison; lorsqu'un nouveau secteur était fouillé, les anciens pouvaient donc déjà être recouverts. Il en résulte des erreurs de documentation, surtout sur le site de Chevenez-Combe Ronde avec quatre secteurs différents. Certaines empreintes isolées ont ainsi été numérotées à double (fig. 98).

Lorsque les doublons d'empreintes isolées se trouvent sur la même couche et dans le même secteur, les empreintes ont été renommées pour éviter les confusions. Ce cas ne concerne que le site de Combe Ronde, pour les couches 500, 510, 515 et 520. Cela a notamment posé des problèmes pour

Site	Couche	Secteurs concernés	Empreintes isolées à double
Courtedoux-Bois de Sylleux	1040	1, 20	E1-E7
	1050	1, 20	E1-E12
	1065	1, 20	E1-E4
Chevenez-Combe Ronde	500	1, 3ext	E132-E147
	510	2, 3	E1-E17
	515	1, 2	E1-E5
		1, 3	E11
	520	2, 3	E1-E73
	530	2, 3, 17	E1
		2, 17	E2-E4

Fig. 98. Liste des doublons d'empreintes isolées par site et par couche.

les informations des prélèvements, non reportées de façon systématique après modification. Dans certains cas, il a été nécessaire d'effectuer des recherches pour identifier les empreintes et, au besoin, adapter la documentation. En revanche, lorsque les doublons d'empreintes isolées se trouvent sur la même couche mais dans un secteur différent, elles ne sont pas renommées et conservent leur numéro. Le secteur doit être précisé pour les différencier. Sur le plan synoptique de surface de la couche 500 de ce même site, les doublons des empreintes isolées présentent un astérisque à la suite de leur numéro, afin de les distinguer.

Attribution d'empreintes isolées à des pistes

Il n'est pas toujours facile d'identifier toutes les empreintes de dinosaures formant une piste. C'est parfois après avoir numéroté la plupart des traces d'une couche, en tant qu'empreintes isolées, que des pistes furent encore identifiées. Dans ces cas-là, les empreintes ont été renommées avec un numéro de piste et les modifications effectuées dans la documentation. Ces empreintes ne sont pas comptabilisées comme empreintes isolées puisqu'elles sont maintenant partie intégrante d'une piste. La correspondance entre les anciens numéros d'empreintes isolées et les nouveaux numéros de pistes est indiquée sur le tableau des fiches *empreintes isolées*, dans les colonnes *ancien nom* et *empreinte de piste correspondante*.

Empreintes isolées coïncidant à des surempreintes de pistes

Sur la couche 505 du site de Combe Ronde, il a été constaté à la fin des fouilles que les empreintes isolées correspondaient à des surempreintes de certaines pistes de la couche 500. Il a été décidé de ne pas renommer ces empreintes en pistes, ce qui aurait engendré beaucoup trop de modifications (photographies, prélèvements, relevés, etc.). Sur le plan synoptique de surface de la couche 505, les empreintes restent numérotées en empreintes isolées et les pistes de surempreintes sont symbolisées par des lignes médianes en traitillé gris. Elles sont nommées, selon la nomenclature, comme OTw (*over trackway*) (fig. 70), mais ne sont pas considérées comme des pistes à part entière afin d'éviter une mise à jour pour chacune des empreintes isolées.

Ces empreintes sont comptabilisées comme empreintes isolées et non comme empreintes de pistes.

6.2 Documentation technique

6.2.1 Relevés de terrain à l'échelle 1:20

Le relevé de terrain à l'échelle est réalisé sur une feuille A4, transparente, de type polyester mat (polymat). Le support utilisé pour le dessin est recouvert d'un papier millimétré, permettant ainsi un travail de précision. La feuille standard est constituée d'un cartouche d'en-tête et d'une plage de dessin de 20cm x 20cm (fig. 99). Celle-ci correspond, pour une échelle standard 1:20, à une emprise de 4m x 4 m. Les directions x et y, indiquant les coordonnées locales, sont mentionnées.

Le cartouche comporte le code du site, l'année et le numéro de relevé. Sont également indiqués, les numéros de secteur et de couche, l'échelle utilisée, le nom du dessinateur et la date de dessin. Une flèche exprimant la direction du nord ainsi qu'un espace pour des informations additionnelles complètent le cartouche.

La géoréférence est assurée par des coordonnées locales; en leur absence, le dessinateur indique un axe défini par deux points, A et B, qui seront ensuite topographiés (fig. 100).

Les objets documentés sont les empreintes de dinosaures, les failles tectoniques et les limites de la couche observée. Les premières années de fouille, les polygones de dessiccation ont également été dessinés. Les rares fossiles présents sur la couche figurent eux aussi sur les relevés (invertébrés, dents, etc.).

À noter que si, aux débuts, tous les éléments ont été documentés sur la même feuille, les empreintes et les failles l'ont été par la suite sur des relevés séparés afin de faciliter la numérisation des données.

Technique de dessin

Le dessin des ichnofossiles a été réalisé pendant plusieurs années en noir et blanc. Depuis 2010, pour faciliter la standardisation vectorielle (DAO), les relevés sont réalisés en couleur (fig. 101). L'usage des couleurs permet de distinguer les différents types de traits, dans le cas présent les contours principaux, intérieurs et extérieurs des empreintes de dinosaures (fig. 62a; chap. 6.3.1.3).

Le dessin des failles tectoniques est toutefois systématiquement exécuté en noir et blanc (fig. 102).

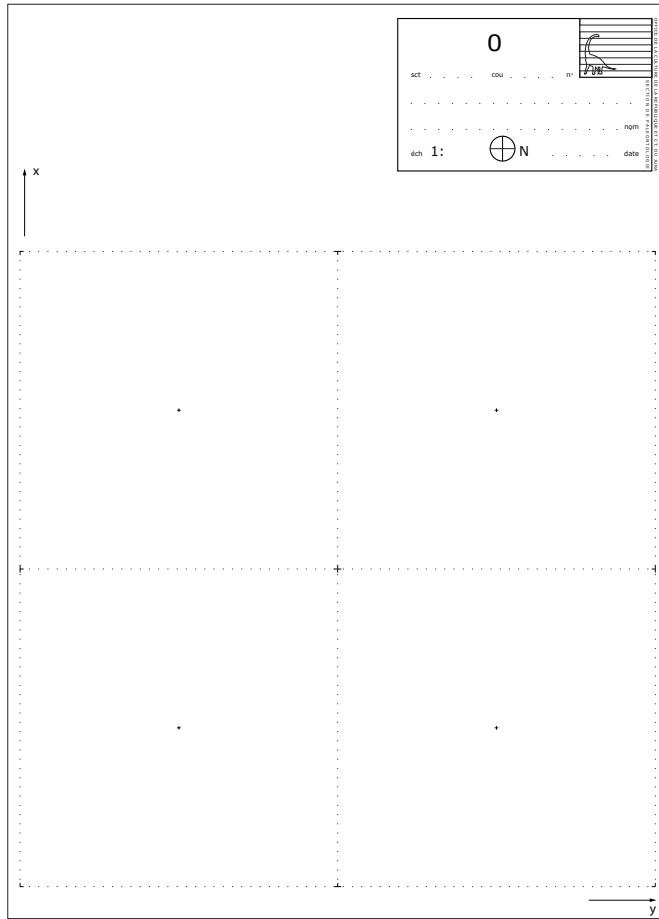


Fig. 99. Exemple de feuille standard pour un relevé de terrain à l'échelle 1:20.

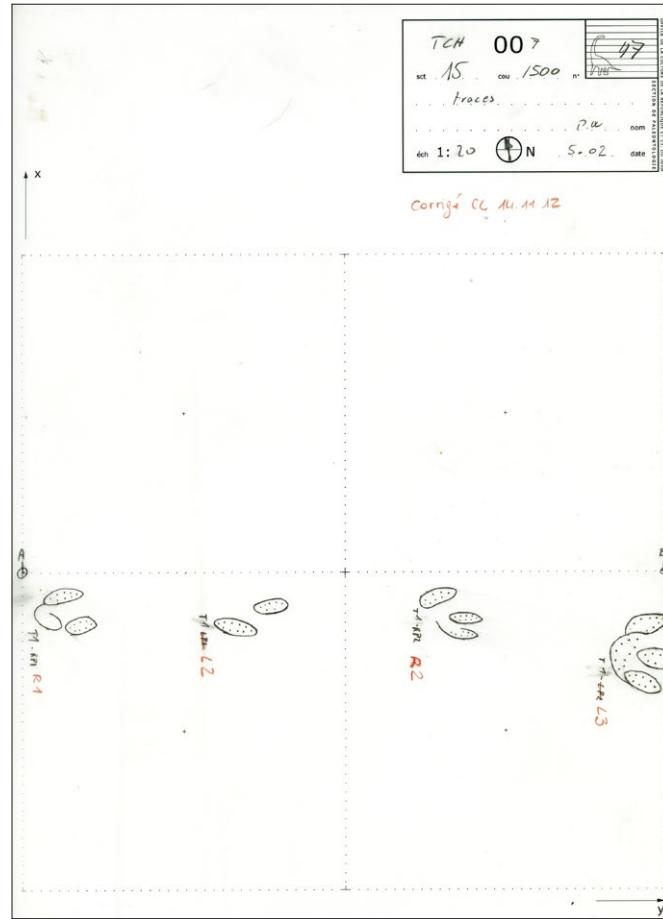


Fig. 100. Exemple de relevé de terrain avec points de référence.

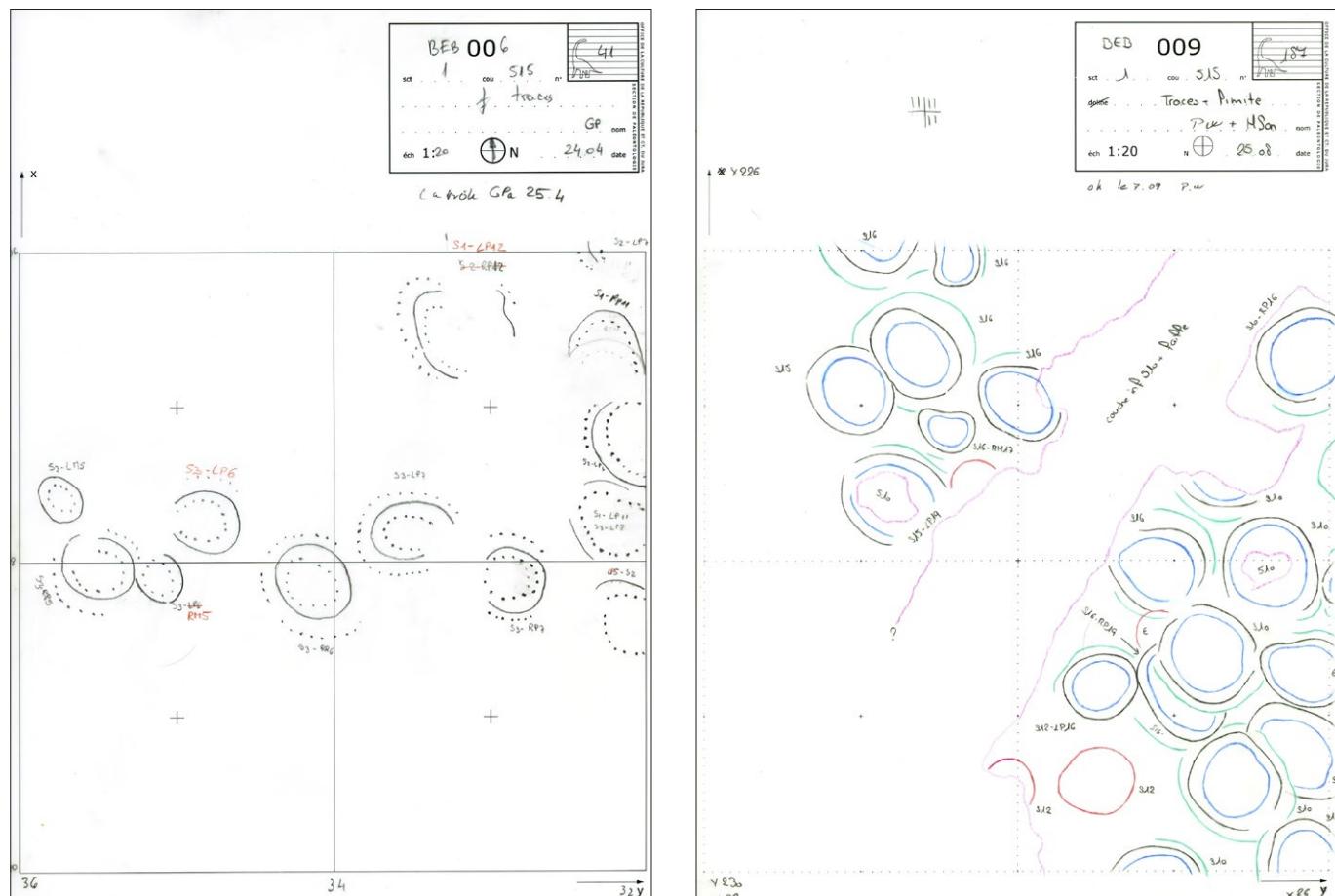


Fig. 101. Exemples de relevés de terrain en noir et blanc et en couleur.

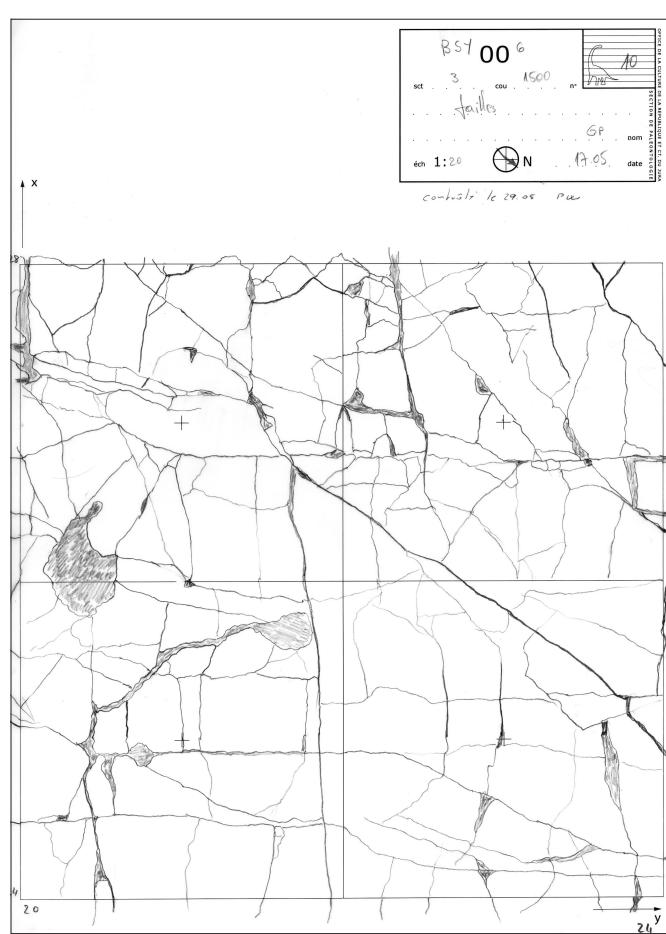


Fig. 102. Exemple de relevé des failles tectoniques.

6.2.2 Relevés de terrain à l'échelle 1:1

Technique de dessin

Ces relevés de terrain s'effectuent sur un film rigide et transparent en polyester de type Folex Folanorm. Bien que le nom de cette entreprise ait été fréquemment utilisé, le terme monofilm a été retenu pour désigner cette sorte de support. Plusieurs couleurs ont été utilisées pour différencier les éléments représentés, les empreintes et leurs numéros, les failles et les figures sédimentaires (fig. 103).

De même que pour les autres types de relevés de terrain, le dessinateur indique sur le monofilm le code du site, l'année de documentation, le numéro de relevé, le secteur, la couche, ses initiales, la date et une flèche pour signaler la direction du nord. Afin de pouvoir situer les éléments dessinés, et au besoin les repositionner sur le plan de la couche concernée (plan synoptique de surface), un ou deux points du réseau des coordonnées locales sont marqués sur le monofilm. Si la zone dessinée se trouve en dehors de ce réseau, un axe défini est indiqué par deux points (A et B) qui seront ensuite topographiés (fig. 104; chap. 3.2).

Les monofilms se divisent en deux groupes, caractérisés par leur taille. Une petite quantité de dessins sur monofilms a été réalisée pour mettre en évidence des détails importants d'empreintes intéressantes, dans la plupart des cas déjà dessinées au 1:20. Ces suppléments d'information concernent uniquement la couche 500 du site de Combe Ronde et la couche 1065 du site de Tchâfouè. Ces supports n'excédant pas le format A3, ils sont archivés dans des classeurs.

La deuxième catégorie de monofilms concerne des relevés de taille plus importante et non uniforme; c'est pourquoi ils sont enroulés pour l'archivage. Durant les premières années de fouille, ces grands monofilms ont été réalisés sur le terrain dans le même but que ceux de plus petite taille, c'est-à-dire pour documenter les meilleures parties de certaines pistes. Dans un deuxième temps, ces supports ont servi à documenter des zones ou des

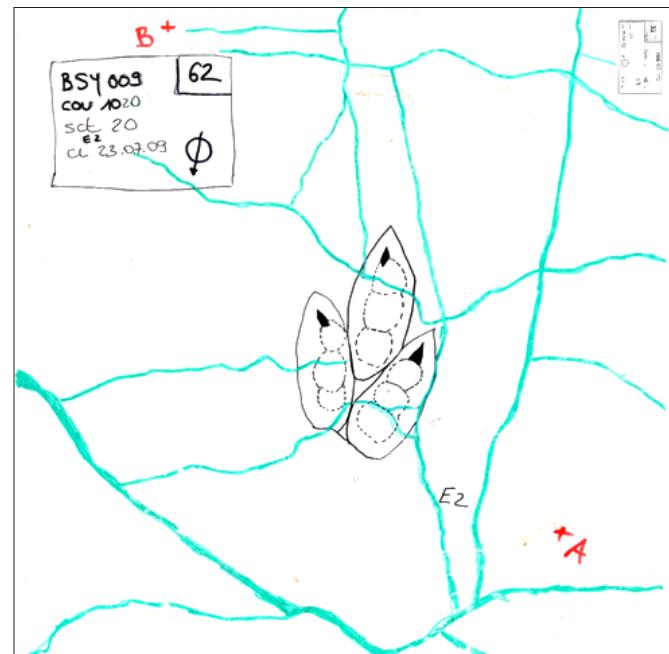


Fig. 104. Exemple de relevé de terrain sur monofilm.

couches qui n'auraient pas pu être dessinées de manière habituelle au 1:20 par manque de temps.

Numérisation

Dans les cas où la documentation graphique d'une piste ou d'empreintes s'est faite uniquement sur monofilms, ceux-ci ont été scannés pour la vectorisation. L'entreprise Diazzo à Bâle en a été chargée par deux fois.

Destinés à être vectorisés pour les plans synoptiques de surface, avec une réduction de format à l'échelle 1:50, les monofilms ont été numérisés à basse résolution. Afin de permettre une bonne lecture des structures lors de leur vectorisation, la définition minimale a été fixée à deux pixels sur la largeur des traits du dessin. La vectorisation s'est effectuée de manière identique à celle des relevés de terrain au 1:20 (chap. 6.3.1).



Fig. 103. Réalisation in situ d'un relevé de terrain sur monofilm. Les failles sont représentées en bleu et les empreintes en noir.

6.2.3 Techniques de moulage de traces de dinosaures

6.2.3.1 Réalisation des moules

Introduction

La reproduction d'objets ou de surfaces est une pratique très répandue dans le domaine de la paléontologie. Les techniques de moulage présentent un intérêt avant tout scientifique. Elles ont permis, sur les chantiers de fouille de la Transjurane, de documenter de nombreuses surfaces à traces de dinosaures avant qu'elles ne soient recouvertes ou détruites par la construction de l'autoroute. Ainsi, les scientifiques ont toujours la possibilité de mesurer, d'étudier et d'analyser les empreintes au moyen de leurs copies.

Les moulages revêtent également un intérêt muséographique non négligeable, et permettent une diffusion à large échelle du patrimoine régional. L'exposition des moulages dans les musées donne désormais la possibilité d'appréhender la science et le patrimoine paléontologique ailleurs que sur le terrain.

Outre ces deux aspects, les techniques de moulage sont également intéressantes du point de vue pédagogique (fig. 105). Certains détails anatomiques peuvent être mis en évidence de manière artificielle, facilitant ainsi leur compréhension par le grand public.

Sur chacun des sites documentés par la Paléontologie A16, les empreintes les plus intéressantes du point de vue scientifique, ou les mieux préservées, ont été documentées sous forme de moulages. Le cas de Courtedoux-Combe Ronde est cependant particulier. Faisant partie des premiers sites documentés, voué à l'origine à disparaître, la décision a été prise de réaliser des tirages de l'intégralité des pistes de la couche 500 du secteur 3. Cette partie du site ayant finalement été préservée, recouverte de gravats, les tirages réalisés offrent ainsi la possibilité de reconstituer la quasi-totalité de ces pistes.

La taille des objets reproduits varie de quelques centimètres carrés pour une empreinte de petit dinosaure tridactyle à près de 15 m² pour des extraits de pistes de saurodopes de taille moyenne.

Pour plus de 17 000 m² de surfaces à empreintes de dinosaures documentées, une étendue d'environ 350 m² parmi les meilleures a été reproduite, la plupart du temps à deux exemplaires, totalisant ainsi plus de 600 m² de copies.

Terminologie

L'objectif de la technique de moulage utilisée est la reproduction exacte de surfaces à traces de dinosaures issues du terrain. Afin d'éviter toute confusion, les collaborateurs du système d'information documentaire de la Paléontologie A16 (SID) ont défini une nomenclature précise pour les différentes opérations qui proviennent de cette méthode de duplication.

La matrice en silicone est réalisée – sur le terrain – par application d'un mélange liquide sur les surfaces à copier. Elle est définie comme étant le moule, puisqu'elle servira de modèle pour la reproduction des traces, par le procédé dit du moulage. Chaque réplique de l'objet réalisé à partir du moule en silicone, qu'elle soit en polyester, en polyuréthane, en plâtre ou en ciment, est définie sous le terme de tirage qui peut être produit à un seul ou à plusieurs exemplaires, générant ainsi une ou plusieurs copies de l'objet.

Matériel utilisé

L'utilisation de l'élastomère de silicone (polymère organique de nature minérale) garantit au moule une conformité à l'original d'une précision de quelques microns. Afin d'éviter toute déformation du moule, une coque en plâtre, rigide, est réalisée et disposée sur la matrice.

La quantité de silicone utilisée pour la réalisation des moules sur les surfaces à traces de dinosaures, relativement irrégulières (présence de nombreuses failles), est d'environ 6 kg par mètre carré.

Fabrication du moule :

- silicones et catalyseurs: Kōraform K12 - Kōraform B132 ; Silastic 3483 - 83NW; Silastic 3133 - 33NW;
- agent thixotrope: Silastic THIXO ADDITIVE;
- agent de démoulage: SIKA Trennmittel 815 Quick;



Fig. 105. Atelier pédagogique Dessine-moi un fossile, une animation de Jurassica. Mesure d'empreintes de dinosaures de taille réelle sur un moulage en polyester.

- bandes de mousse synthétique pour les bordures;
- spatules de cuisine en caoutchouc.

Fabrication de la coque en plâtre:

- plâtre en poudre; eau; fibre de verre; film alimentaire.

Méthode de réalisation

La technique utilisée pour reproduire les traces de dinosaures est celle du moulage. En paléontologie, cette technique consiste à appliquer plusieurs fines couches successives de silicone sur la surface à dupliquer. Une coque rigide, en plâtre, est ensuite confectionnée. Elle garantit la conservation, sur le silicone, des irrégularités originnelles du terrain. Ce procédé peut être utilisé pour la réalisation de moules des petites comme des grandes surfaces.

Sur les chantiers de la Paléontologie A16, les objets à reproduire sont numérotés à l'aide d'une étiqueteuse de marquage en relief, permettant une numérotation lisible sur le silicone. Les critères de numérotation ont été définis de façon spécifique en vue d'une identification rapide de chaque objet. Sont ainsi inscrits le code du site, l'année de documentation, l'abréviation r indiquant qu'il s'agit d'un relevé de terrain, et le numéro d'inventaire (CRO004-r1, p. ex.)

L'ajout, sur la surface à mouler, d'une flèche indiquant le nord, en relief elle aussi, permet d'indiquer la direction de déplacement du dinosaure.

Des bandes de mousse synthétique sont tout d'abord disposées en périphérie de la surface à reproduire, afin de la délimiter de façon précise (fig. 106) et d'éviter l'écoulement du silicone. Un agent démouleur est appliqué sur la surface pour faciliter la séparation entre le silicone durci et la roche lors du démoulage.

Sur le terrain, le silicone liquide est mélangé à environ 3 à 5 % de produit catalyseur, qui permettra le passage du fluide à une phase solide. L'ajout de quelques gouttes d'agent thixotrope épaisse quant à lui le matériau. Deux couches de silicone sont



Fig. 106. Délimitation de la surface à dupliquer au moyen de bandes de mousse synthétique.

ensuite appliquées au moyen de spatules de cuisine en caoutchouc. La première couche, très liquide, s'insère dans les fines aspérités et assure la reproduction des détails les plus fins.

Une seconde couche, rendue plus épaisse par thixotropie, est ensuite appliquée sur l'intégralité de la surface. Elle doit conduire à l'obtention d'une épaisseur suffisante du moule (minimum 5 mm) pour qu'il résiste aux contraintes du démoulage sans se déchirer.

Une fois le silicone sec, une coque rigide est confectionnée par-dessus (fig. 107). Réalisée en plâtre consolidé à l'aide de fibre de verre, elle permet au silicone de conserver les irrégularités de la surface initiale (ici, les traces de dinosaures) et d'éviter sa déformation lors de l'entreposage.



Fig. 107. Réalisation de la coque en plâtre en plusieurs parties.

Pour des questions de maniabilité, les coques des plus grands objets sont réalisées en plusieurs parties qui peuvent être transportées séparément de façon sécurisée, puis repositionnées côté à côté. Un film alimentaire est appliqué autour de chaque coque afin de l'isoler du moule en silicone et des bordures en mousse, et éviter ainsi l'adhérence entre les différents matériaux.

Le numéro du relevé de terrain est reporté sur chaque moule au moyen d'un marqueur indélébile, ainsi que sur les bordures en mousse et sur les coques de plâtre.

Contraintes de production

La réalisation des moules en silicone implique certaines contraintes, liées à leur réalisation en plein air.

La présence d'électricité sur les chantiers de fouille est indispensable pour optimiser les différentes phases de réalisation. Elle permet notamment l'homogénéisation des matériaux (silicone et plâtre) au moyen d'un outil mélangeur, avant leur utilisation.

La pluie et le froid pouvant altérer le processus de moulage, il est essentiel de protéger les surfaces à reproduire, afin d'éviter que de l'eau ne s'insère entre les différentes couches de silicium et n'empêche leur agglomération. Il est également conseillé de veiller à ce qu'aucune impureté (feuilles, terre, etc.) n'adhère au silicium non polymérisé.

En fonction des conditions météorologiques, des serres ont été utilisées afin de protéger les surfaces à reproduire. Des chauffages à air ont également été employés en hiver pour garantir la polymérisation du silicium.

Manutention

Selon l'avancée des travaux de terrain et des conditions météorologiques, les siliciums, une fois polymérisés (fig. 108), sont soit livrés à une entreprise régionale, Berberat Polyester Sàrl à Develier (JU), afin d'y être reproduits, soit entreposés de façon temporaire sur le terrain. Dans le cas d'un stockage de plus longue durée, ils sont acheminés vers un entrepôt et conditionnés en attendant d'être pris en charge pour leur duplication.

Afin d'éviter toute déformation ou détérioration du matériau, une grande attention doit être observée lors de la manutention et du stockage. Pour le transport, les siliciums peuvent être enroulés de façon temporaire pour faciliter leur déplacement.

Une fois arrivés sur le lieu de fabrication ou de stockage, ils sont repositionnés sur leur coque en plâtre rigide. Relativement stable à court terme, le silicium peut se déformer avec le temps et en cas de variations importantes de température ou d'humidité. Avec des conditions de stockage optimales (stockage à plat, température et humidité relativement stables), le silicium peut se conserver environ 10 ans sans subir de déformations importantes; au-delà, la qualité du matériau n'est plus garantie.



Fig. 108. Démoulage et vérification de la qualité du silicium polymérisé.

6.2.3.2 Réalisation des tirages

Le choix de la méthode utilisée pour la réalisation de copies est conditionné par diverses contraintes: le poids, la maniabilité, la solidité du matériau ou des raisons budgétaires, par exemple.

Deux possibilités s'offraient ainsi à la Paléontologie A16 pour la reproduction des traces de dinosaures: le laboratoire interne de préparation-conservation ou une entreprise externe mandatée.

Suite à des essais réalisés par le personnel de la Paléontologie A16 dans son propre laboratoire, la décision a été prise de confier le mandat à une entreprise externe, à l'exception des reproductions de petite taille.

La plus grande partie des tirages de traces de dinosaures a été réalisée en polyester et en fibre de verre par l'entreprise Berberat Polyester. S'agissant pour l'essentiel de surfaces de moyenne à grande taille (jusqu'à 15 m²), il n'était pas envisageable pour la Paléontologie A16 de développer les infrastructures nécessaires à l'élaboration de grands tirages, ni en grande quantité. De plus, un équipement de laboratoire particulier est indispensable afin d'évacuer les vapeurs toxiques de styrène, émises par les résines lors de la polymérisation. Les empreintes de petite taille (principalement les empreintes isolées de dinosaures tridactyles) ont cependant été reproduites par les préparateurs-conservateurs de la Paléontologie A16, dans leur laboratoire de Spira, à Porrentruy.

Afin de trouver le matériau optimal à la reproduction des surfaces à traces de dinosaures, plusieurs substrats ont toutefois été testés, avec plus ou moins de succès. Les tout premiers essais ont été réalisés par les préparateurs-conservateurs dans les laboratoires de la Paléontologie A16 au moyen d'une résine époxyde.

Premiers essais en résine époxyde

Matériel utilisé:

- résine époxyde (Beracryl); durcisseur; fibre de verre.

Dès les premiers essais, un dégagement d'odeurs désagréables a été constaté. Considéré comme n'étant pas idéal pour la réalisation de copies de traces de dinosaures, ce premier matériau a été remplacé par une résine polyuréthane.

Tirages en résine polyuréthane

Matériel utilisé:

- résine polyuréthane à deux composants: Biresin G27 (résine non chargée à prise rapide); fibre de verre.

Le produit utilisé, tout comme la résine acrylique, est dosé avec 50 % de résine pour 50 % de durcisseur, le tout étant renforcé de fibre de verre pour les tirages de taille moyenne. Une surface test d'environ 10 m² a été réalisée.

Vu les difficultés rencontrées lors de la réalisation des tirages de grande taille dans des locaux non adaptés (espaces trop restreints, absence de ventilation adéquate), seuls les plus petits tirages ont finalement été produits dans les laboratoires de la Paléontologie A16.



Fig. 109. a) application au pinceau d'une petite quantité de plâtre; b) démoulage d'une copie réalisée en plâtre.

Afin de réduire les coûts de production, des alternatives ont été trouvées pour remplacer l'utilisation des résines, relativement coûteuses. Le polyuréthane étant par ailleurs photosensible, le risque existe de le voir se désagréger sous l'effet de la lumière du jour. Afin de remplacer ce matériau, des tirages en plâtre ont donc été réalisés. Plus stable, le plâtre est néanmoins moins solide et plus lourd que la résine; pour cette raison, seules des empreintes de petite taille ont été reproduites de cette manière (fig. 110).

Tirages en plâtre

Matériel utilisé :

- plâtre en poudre ; eau ; pinceaux ; seau pour le mélange

Méthode de réalisation

Vu la petite taille des empreintes, il n'est pas nécessaire de renforcer la coque en plâtre avec de la fibre de verre comme pour les plus grands moules.

Une fois le moule en silicone bien positionné sur sa coque, le plâtre en poudre est mélangé avec de l'eau dans les proportions adéquates. Le mélange ainsi obtenu doit demeurer suffisamment liquide pour remplir tous les creux du moule, afin d'obtenir une copie conforme à l'original dans les moindres détails. Pour cela, une

petite quantité de plâtre est d'abord appliquée minutieusement au pinceau (fig. 109a). Le reste du mélange confectionné est ensuite versé jusqu'à une épaisseur suffisante sur la totalité du moule.

Après une lente phase de séchage et le démoulage, les bords de la copie peuvent être sciés afin d'obtenir des contours propres et nets (fig. 109b).

Les reproductions peuvent être au besoin patinées avec des pigments naturels pour atteindre une teinte la plus proche possible de celle du terrain (fig. 111). C'est en principe la première copie, la plus conforme au moule original, qui est colorée.

Tirages en ciment

En plus des tirages en plâtre, des reproductions en ciment ont été réalisées pour les plus petites empreintes. Il s'agit d'un matériau relativement bon marché par rapport à la résine, d'un aspect proche de celui de la roche; il a aussi l'avantage d'être plus solide que le plâtre.

Matériel utilisé :

- ciment blanc CP400 ; sable calcaire ; eau ; seau pour le mélange ciment-sable-eau.



Fig. 110. Tirage en plâtre d'une petite empreinte de dinosaure tridactyle.



Fig. 111. Tirage en plâtre, patiné avec des pigments naturels.

Le matériau utilisé pour ce type de reproduction est un mélange de ciment blanc et de sable calcaire, dans des proportions de 400g de ciment par litre. La méthode de fabrication des tirages est la même que pour ceux en plâtre.

Tirages en polyester

La plus grande partie des empreintes et des pistes de dinosaures moulées, soit plus de 330m², a été dupliquée par l'entreprise Berberat Polyester au moyen de supports en polyester. Vu l'importance des découvertes, les surfaces à empreintes reproduites l'ont été pour la plupart à deux exemplaires, totalisant ainsi plus de 600m² de copies de traces de dinosaures. La duplication en plusieurs répliques se justifie par le fait que les silicones réalisés sur le terrain ont une durée de vie relativement courte, et qu'ils sont pour la plupart détruits après fabrication des tirages afin de réduire l'espace de stockage nécessaire.

La reproduction en plusieurs exemplaires de certaines surfaces doit permettre à la fois aux scientifiques d'étudier les empreintes de manière approfondie et au public de les découvrir par le biais d'expositions. Plusieurs pièces sont, à l'heure actuelle, déjà visibles dans des musées régionaux – Jurassica Museum à Porrentruy et Musée jurassien d'art et d'histoire à Delémont – ou étrangers, par exemple à Villers-sur-Mer (Calvados, F).

Matériel utilisé:

- résine (polyester insaturé: solution polyacide et polyalcool);
- accélérateur: octoate de cobalt, à raison de 0,1 à 0,4% en fonction de la température;
- catalyseur: assure le durcissement du matériau. Peroxyde de méthyléthylacétone, à raison de 1,3 à 2 % ;
- gelcoat: mélange de résine isophthalique, de silice colloïdale (lui donnant son aspect gélifiant) et de pigments. « Crystic® Gelcoat 33PA » ;
- mat en fibre de verre: agglomérat de fibres de verre sans orientation particulière, coupées et assemblées entre elles par un liant.

Méthode de réalisation

Le procédé utilisé pour la fabrication de copies de traces de dinosaures est celui du moulage au contact. Il s'agit d'un procédé entièrement manuel de mise en forme de plastiques renforcés, réalisé à température ambiante et sans pression.

Le matériau utilisé est un composite artificiel formé d'une matrice polymère (appelée résine) renforcée par un mat en fibre de verre.

Comme la plupart des procédés de mise en forme des matériaux composites, le moulage au contact nécessite l'utilisation d'un moule, relativement lisse, en silicone. Celui-ci a été réalisé au préalable sur les traces de dinosaures, *in situ*. Le matériau de base, liquide, subit un épaissement en séchant, par polymérisation, et prend un aspect caoutchouteux.

Dans l'atelier, le moule en silicone est d'abord posé sur son support rigide en plâtre (coque), afin d'éviter toute déformation (fig. 112a). Il est ensuite nettoyé à l'air comprimé afin de

supprimer les poussières et les éventuels résidus issus du terrain (brindilles, feuilles mortes, etc.).

Une fine couche de polyester liquide, le gelcoat est étalée au pinceau sur toute la surface du silicone (fig. 112b). Il s'agit d'un produit légèrement pâteux, mélange de résine, de silice colloïdale et de pigments, auquel sont ajoutés un accélérateur, puis un catalyseur. Le tout est ensuite séché six heures à l'air libre. L'utilisation du gelcoat permet d'accroître la résistance aux chocs ainsi que l'étanchéité du matériau final.

Une première couche de résine (sorte de pâte épaisse au moyen de poudres de charge, fabriquée par l'entreprise elle-même) est posée au pinceau sur les protubérances, suivie de la pose d'un mat fin de 150g.

Le mat est un agglomérat de fibres de verre coupées qui sont assemblées entre elles, sans orientation particulière, par un liant (fig. 112c); ce matériau est utilisé pour augmenter rapidement l'épaisseur de la copie et accroître sa résistance à la compression.

Un séchage de douze heures est nécessaire avant d'entamer la suite des opérations.

Des couches de renfort (sous forme de mat de fibre de verre de 450g/m²) imbibée de résine polyester sont ensuite déposées successivement sur le moule. Une pause de douze heures pour séchage est observée après la pose de trois couches successives, jusqu'à obtention de l'épaisseur désirée.

Il est primordial d'éliminer les bulles d'air après chaque pose de mat. Pour ce faire, la surface est lissée au moyen d'un rouleau débulleur (fig. 112d).

Pour la réalisation des grandes copies, quatre couches de mat de 450g/m² sont utilisées, avec deux couches de renfort de 450g dans les bords et sur les parties plus fragiles. Pour la réalisation des petites copies, trois couches de 450g et deux couches de renfort de 450g suffisent.

Des renforts en polyéthylène extrudé (nommés « profils Oméga »), recouverts de deux mats de 450g et de 25cm de largeur, sont ensuite collés sur la surface afin de rigidifier le tout (fig. 112e).

Après durcissement par polymérisation de la résine (séchage), la pièce est démoulée (fig. 112f), les bords découpés à la meule en diamant, puis poncés avec une meuleuse d'angle (fig. 112g). Pour un rendu optimal, un lissage plus fin se fait ensuite au papier de verre (fig. 113 et 114).

Contraintes de production

La fabrication des tirages en polyester doit tenir compte de certaines contraintes. La température des locaux, tout d'abord, doit se situer entre 15 et 30°C. Trop basse, elle remet en cause la polymérisation mais les résines se solidifient trop vite si elle est trop haute, empêchant les opérations importantes que sont l'imprégnation et la suppression des bulles d'air.



Fig. 112. a) silicone posé sur les coques en plâtre, prêt à être copié; b) imprégnation du silicone avec une couche de surface, le gelcoat; c) le mat de fibre de verre est posé sur la couche de résine; d) suppression des bulles d'air au moyen d'un rouleau débulleur; e) collage des renforts en polyéthylène; f) démoulage de la copie en polyester; g) découpe des bords au moyen d'une meule en diamant.

Une seconde contrainte est l'humidité qui doit toujours être inférieure à 65 % lors de la réalisation des tirages. Au-delà, les performances mécaniques du matériau sont altérées et l'osmose favorisée. Un soin particulier doit ainsi être donné au stockage du tissu en fibre de verre (mêmes conditions de température et d'humidité que l'atelier de stratification), afin d'éviter toute condensation.

Prescriptions pour le stockage

Le matériau choisi pour reproduire les traces de dinosaures, le polyester armé, est un produit inerte, relativement stable. Les fluctuations de température dans le local de stockage, par exemple, ne sont pas préjudiciables. Cependant, dans le cas d'un entreposage inadéquat (températures au-delà de 30°C, manque de points d'appui), de légères déformations peuvent survenir,



Fig. 113. L'une des plus grandes copies faites par l'entreprise Berberat Polyester (15 m²; SCR008-r130).



Fig. 114. Copie d'un croisement de pistes de petits dinosaures tridactyles (CRO007-r26).



Fig. 115. Stockage à l'horizontale.



Fig. 116. Il est conseillé de prendre un soin particulier pour le stockage vertical.

notamment pour les plus grands objets. Celles-ci peuvent être corrigées, le cas échéant, en chauffant le matériau avant de le remettre en forme de façon manuelle.

À long terme, un entreposage à la lumière du jour peut également endommager le matériau par le changement de couleur qu'elle induit. Il n'existe cependant pas de risque de désagrégation des tirages comme dans le cas du polyuréthane.

De manière idéale, les copies en polyester seront stockées à l'horizontale, en prenant soin à ce qu'il y ait un point d'appui tous les mètres, dans un endroit sec, frais et à l'abri de la lumière directe (fig. 115). Si un entreposage laissant dans le vide une partie de l'objet n'est pas problématique à court terme, il n'est pas optimal à plus long terme, le polyester risquant de se déformer.

Un stockage sur chant, à la verticale, est également envisageable (fig. 116). Dans ce cas, un point d'appui tous les mètres est préconisé. Il est toutefois nécessaire de prendre en considération qu'avec le temps le polyester peut se déformer sous son propre poids. En été, les températures élevées peuvent favoriser cette déformation qui ne toucherait cependant que les bords des tirages en polyester, sur lesquels s'appliquent les contraintes. Les données scientifiques (taille et forme des empreintes, p. ex.) ne sont donc pas concernées par une éventuelle altération.

Dans le cas d'un stockage sur chant, des nattes en mousse posées à même le sol facilitent la manipulation des objets et permettent un déplacement par glissement, même pour les plus grandes pièces. Il ne s'agit cependant pas d'un système de stockage optimal. Il est nécessaire, afin de permettre aux scientifiques d'étudier les traces de dinosaures directement sur les tirages, de s'interroger sur leur accessibilité et leur maniabilité dans le cadre d'un futur centre de gestion des collections. Les tirages de grande taille étant particulièrement lourds, une attention particulière devrait être portée à l'ergonomie du lieu.

Pour terminer, il est conseillé de tenir les objets en polyester éloignés du feu, le matériau dégageant des vapeurs fortement toxiques en brûlant. Les résines ignifuges, plus chères et plus difficiles d'emploi, n'ont pas été employées car elles ne garantissent pas non plus une conservation des données en cas d'incendie.

6.2.4 Techniques de prélèvement de traces de dinosaures

6.2.4.1 Extraction des prélèvements sur le terrain

Introduction

Pour sauvegarder une partie du patrimoine paléontologique et pour permettre une étude exhaustive des sites à traces de dinosaures, une quantité importante de matériel a été prélevée durant les fouilles. Il s'agit essentiellement de plaques et de blocs présentant des empreintes, des remplissages (contre-empreintes) ou des figures sédimentaires. Des échantillons de sédiments destinés à la recherche de microfossiles ou à des analyses en laboratoire ont également été prélevés, ainsi que divers fossiles (chap. 4 et 5).

Concernant les prélèvements d'empreintes ou de structures sédimentaires (fig. 117), une méthode a été élaborée sur l'ensemble des chantiers de la Paléontologie A16. Elle varie parfois, en fonction de la taille des blocs à prélever et de l'épaisseur de la couche concernée. La base de la méthode reste toutefois la même pour tous les prélèvements fragilisés dans leur structure et consiste à encoller les surfaces définies avec une colle à base d'acétate de polyvinyle (Mowilith® 60) renforcée à l'aide d'un tissu en fibre de verre, ce qui permet d'extraire les blocs sans qu'ils ne se désagrègent.

Différents types de prélèvements d'empreintes ont été effectués sur les sites à traces. Les prélèvements de grandes surfaces, dont l'épaisseur n'excède pas une dizaine de centimètres, sont découpés en plusieurs blocs, et l'ensemble est destiné à être reconstitué. Dans d'autres cas, les blocs sont prélevés isolément. De manière générale, lorsque cela était possible, ce sont les meilleures empreintes de la couche qui ont été extraites.

Pour les prélèvements massifs et de grande taille, la méthode est décrite dans les cas particuliers.

Matériel utilisé

Marquage et dessin: craies, feutres indélébiles, crayons, sous-main (pour dessiner le plan des prélèvements), boussole.

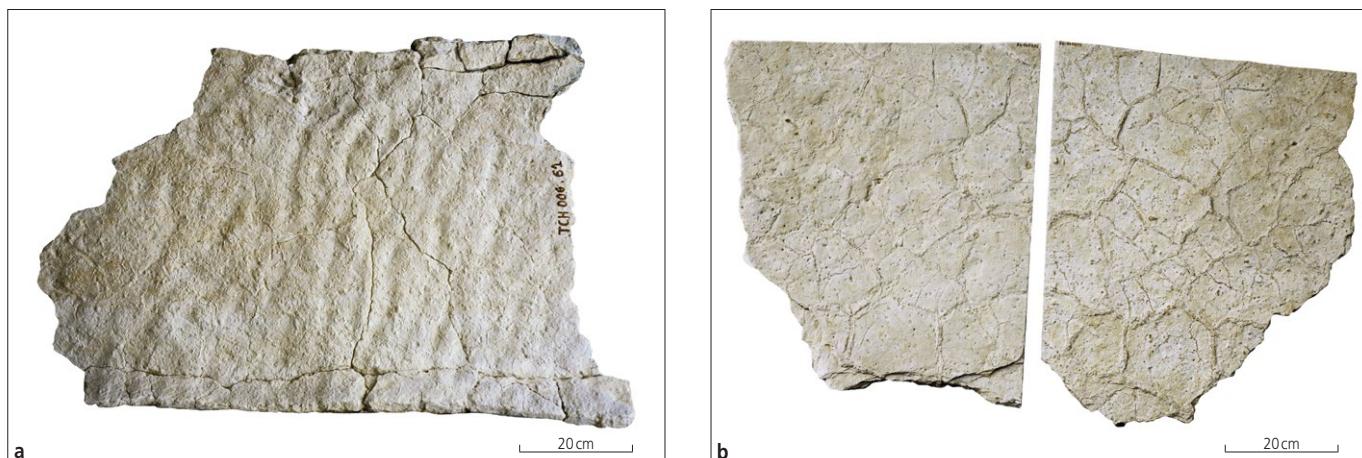


Fig. 117. Prélèvements de figures sédimentaires, après préparation : a) rides de vagues (TCH006-61); b) polygones de dessication (BEB010-79).

Encollage et extraction : fibre de verre, Mowilith® 60, bidons vides (pour mélanger), ciseaux, cutter, pinceaux, gants de travail, lunettes de protection, masque de protection, scie circulaire, massettes, burins, barres métalliques plates.

Stockage : palettes, planches en bois

Méthode de prélèvement

La première étape consiste à définir la surface à prélever, si possible délimitée par des failles pour faciliter l'extraction des prélèvements. Pour les grandes surfaces extraites en plusieurs blocs, les failles sont dessinées à la craie afin de pouvoir, après encollage, les retracer sur la surface grâce à la transparence de la colle. Ce dessin permettra de prélever les pièces de façon plus aisée, en les séparant le long des failles.

Encollage

La surface de chaque bloc est solidifiée par l'application d'une première couche de colle (Mowilith® 60). Puis un tissu en fibre de verre, découpé au préalable à la taille adéquate, est déposé par-dessus. Ce dernier est ensuite complètement recouvert d'une deuxième couche de colle, en veillant à éviter un maximum les bulles d'air sous la fibre, qui diminueraient les zones de contact (fig. 118). Certains prélèvements isolés ne nécessitent aucune consolidation sur le terrain, car leur structure est assez résistante (fig. 119).



Fig. 118. Application de la deuxième couche de Mowilith® 60 avec un pinceau, afin de recouvrir complètement le tissu de fibre de verre.

Marquage

Chaque prélèvement reçoit un numéro, précédé du nom du site et de l'année de documentation pour former un code distinctif, BSY009-19 par exemple. Ce code est inscrit au moyen d'un feutre indélébile sur la fibre de verre ou la surface du prélèvement. Le contour des empreintes est marqué au feutre ; leur numéro individuel, de couche et de secteur, les initiales des fouilleurs, une indication du nord géographique et la date de prélèvement sont également renseignés. Pour les prélèvements de zones à reconstituer, il est important d'aussi spécifier les jonctions des blocs les uns par rapport aux autres (fig. 120).

Plan index

Afin de faciliter la reconstitution des grandes surfaces, un plan indiquant le pourtour des prélèvements et leurs connexions entre eux est réalisé au moment de la consolidation (fig. 121). Ce plan est ensuite digitalisé par couche concernée et prend le nom de plan index des prélèvements (chap. 6.3.2). Les couches comprenant uniquement des prélèvements isolés ne sont pas représentées sur les plans index.

Extraction

Le prélèvement est ensuite détourné au marteau et au burin afin d'en dégager le pourtour et en faciliter l'extraction. Une scie



Fig. 119. Exemple de prélèvement isolé solide ne nécessitant pas de consolidation.



Fig. 120. Exemple de prélevements numérotés et annotés pour rendre la distinction et le remontage plus efficaces.

circulaire à main a parfois été utilisée pour délimiter les blocs à extraire lorsque la surface était trop compacte (fig. 122). Des barres métalliques sont ensuite insérées précautionneusement sous le prélèvement, en veillant à ne pas l'abîmer (fig. 123). Le prélèvement est ainsi décollé de la couche sous-jacente et une plaque de bois est glissée sous les barres de fer (fig. 124). Elle permet de soutenir le bloc prélevé et d'éviter la perte de matériel rocheux de la face inférieure. Une fois extraits, les prélevements isolés sont parfois encore sciés horizontalement ou verticalement, pour réduire leur poids et leur taille.

Stockage

Les prélevements de faible épaisseur sont stockés sur une palette, empilés les uns sur les autres, chacun étant au préalable posé sur une planche. Celles-ci sont ajustées avec des cales en bois afin de maintenir la pile en équilibre et protéger les prélevements de la dégradation (fig. 125).

Les prélevements lourds sont déposés sur une plaque métallique puis stockés sur une palette sans empilement, pour que leur déplacement soit plus aisé.



Fig. 123. Décollage du prélèvement en tapant sur l'extrémité de barres métalliques pour les glisser dessous.

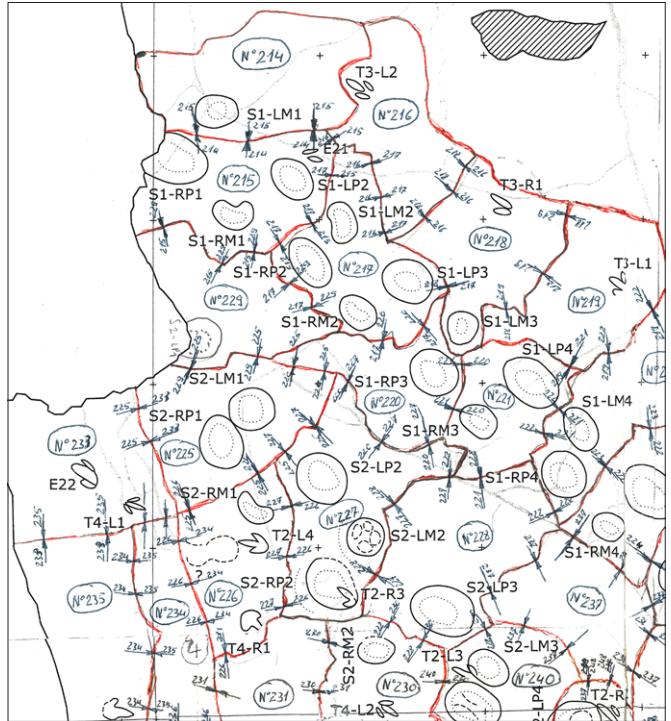


Fig. 121. Exemple d'un extrait de plan index des prélevements (Courtedoux-Tchâfoué, couche 1060).



Fig. 124. Prélèvements déposés sur des planches en bois, en attente d'être empilés sur une palette pour le déplacement.



Fig. 125. Palettes avec des prélevements empilés, prêtes à être transportées vers leur lieu de stockage.

Contre-empreintes

Lorsqu'une couche est entièrement documentée, il est nécessaire de la décapier pour découvrir les empreintes de la couche sous-jacente. Le décapage a parfois permis de récupérer de belles contre-empreintes, c'est-à-dire les moules naturels positifs (fig. 126), qui peuvent parfois même contenir plus de détails anatomiques que l'empreinte elle-même. Pour une question de documentation et de recherche facilitée dans la base de données, les prélevements de contre-empreintes reçoivent le même numéro de couche que les empreintes auxquelles ils correspondent.

Contraintes – cas particuliers

Certains prélevements de grande dimension dont la couche atteignait une épaisseur de plus de 10 cm se sont avérés difficiles à scier avec le matériel à disposition de la Paléontologie A16. Une entreprise privée a donc été mandatée pour extraire les grandes traces de théropodes de la couche 1500 de Courtedoux-Sur Combe Ronde et les pistes de petites empreintes de sauro-podes de la couche 1040 de Courtedoux-Bois de Sylleux.

Dans le premier cas, l'objectif était de prélever les plus belles empreintes d'une piste, certaines d'entre elles ont été utilisées comme types pour la définition d'un nouvel ichnogenre (Marty et al. 2017). Ces empreintes d'une même piste ont également un intérêt muséographique : elles peuvent être rassemblées pour reformer une partie de la piste.

Dans le second cas, l'objectif était de prélever les pistes de petites empreintes dans le but de les étudier en détail, car elles ont été laissées par des « bébés » sauropodes, constellation unique au monde.

Dans les deux cas, ce sont de larges prélevements qui ont été traités selon la méthode standard jusqu'au détourage du pourtour. C'est au moment de dégager le fond du prélevement que l'entreprise mandatée est passée à l'œuvre pour scier horizontalement les zones choisies avec une scie à câble.

Cette technique de sciage nécessite un espace bien dégagé sur tout le pourtour des prélevements concernés afin de pouvoir y

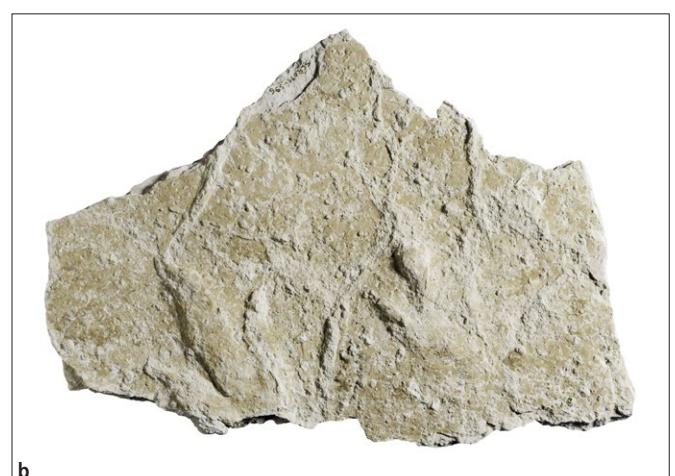
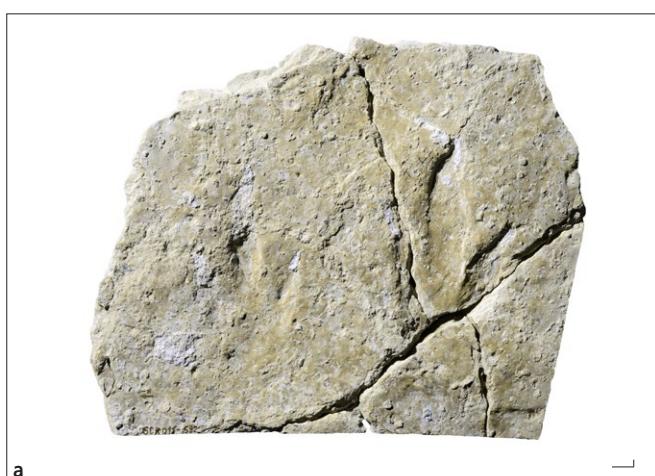


Fig. 126. Courtedoux-Sur Combe Ronde: prélevements des pistes T2 et T3 (couche 1055): a) empreintes (SCR011-592); b) contre-empreintes (SCR011-596).

passer le câble. La phase de détourage est donc importante. Plusieurs coupes verticales sont faites à la scie circulaire tout autour du prélèvement, puis le calcaire entre les coupes est retiré à l'aide de marteaux et de burins, de façon à créer un espace d'au moins 50 cm de large autour des zones à scier (fig. 127 et 128).



Fig. 127. Courtedoux-Sur Combe Ronde: marquage au sol des zones à scier verticalement pour les prélèvements d'empreintes de la piste T1 de la couche 1500 (SCR011-554, 555 et 556).



Fig. 128. Détourage du pourtour des prélèvements de la figure 127.



Fig. 129. Sciage horizontal d'un prélèvement avec un câble. Mise en place de cales pour soulever le prélèvement au fur et à mesure de l'avancée du câble.

Une fois le pourtour bien dégagé, les flancs des prélèvements sont consolidés avec de la Mowilith® 60 et de la fibre de verre. Une sangle est également tendue autour du prélèvement pour éviter que des blocs ne se détachent lors du sciage et du transport. L'entreprise met ensuite en place le câble qui va servir à désolidariser les prélèvements de leur base (fig. 129).

Les prélèvements sont parfois encore sciés verticalement ou séparés à la main le long d'une faille pour réduire leur taille afin de rendre leur transport et leur stockage plus faciles (fig. 130).

Ils sont ensuite déposés sur des plaques métalliques puis des palettes en bois pour assurer leur stabilité. Pour finir, les palettes sont chargées sur un camion pour le transport jusqu'au lieu de stockage (fig. 131).

Traitements des prélèvements

Une fois les prélèvements dans leur lieu de stockage, ils sont mis en attente de traitement par le laboratoire de préparation-conservation. Les différentes opérations effectuées, qui dépendent de la qualité de préservation des prélèvements, sont détaillées dans le sous-chapitre suivant.



Fig. 130. Sciae vertical pour réduire la taille des blocs et faciliter leur transport.



Fig. 131. Prélèvements enduits de Mowilith® 60, sciés et sanglés, prêts à être déposés sur une plaque métallique et une palette.

6.2.4.2 Préparation-conservation des prélèvements

Introduction

Les prélèvements issus des sites à traces de dinosaures, souvent fragilisés dans leur structure, requièrent une attention particulière. Une grande partie d'entre eux présente en effet des fissures en surface, voire des fractures traversant l'épaisseur de la roche. Certains prélèvements très fins sont, quant à eux, extrêmement friables et, de ce fait, bien fragiles.

Une intervention de préparation-conservation est donc nécessaire pour maintenir et consolider les fragments de roche entre eux, pour combler certaines fissures ou pour effectuer des collages. Afin de pallier les problèmes de manipulation des prélèvements, il a été décidé de procéder à une intervention de consolidation, en créant un support de maintien. Ce support est avant tout dédié aux prélèvements de grande envergure, dont les morceaux fracturés ne peuvent pas simplement être recollés entre eux.

Choix d'une technique

Dans le cadre d'un travail de bachelor (Miserez 2012), des recherches ont été réalisées sur le type de support à concevoir pour les centaines de prélèvements de couches géologiques à traces de dinosaures. La première partie de cette méthodologie est le résultat de cette étude. Les critères demandés pour la réalisation du support étaient les suivants :

- collage et consolidation des fragments à l'aide d'un support de maintien
- résistance des matériaux choisis afin d'assurer le soutien par rapport au poids de la roche
- réversibilité du support
- aspect esthétique et discret du support
- mise en œuvre simple et facilité de manipulation pour le transport, le stockage et l'étude
- coût raisonnable.

Ces six points sont le résultat de nombreuses discussions entre les scientifiques et les préparateurs-conservateurs, alliant les besoins de l'étude aux critères relatifs à l'éthique de la préparation-conservation.

Très vite, le travail de recherche s'est orienté vers un support avec une couche d'intervention appliquée directement au revers des prélèvements. Les investigations se sont donc dirigées vers différents types de produits, des mortiers synthétiques et minéraux, pouvant servir de couche d'intervention. Neuf mortiers ont été sélectionnés pour être testés selon les critères suivants :

- mise en œuvre aisée du matériau
- adhérence du matériau à la roche
- adhérence du matériau à l'aluminium
- réversibilité du matériau.

Les matériaux retenus après les tests sont ceux qui ont une composition minérale, en raison de leur caractère inerte, de leur compatibilité avec la roche et de leur réversibilité mécanique. Toutefois, un mortier minéral demeure plus friable qu'un mortier synthétique, raison pour laquelle il a été décidé de fixer sur la

préparation une plaque de soutien en aluminium pour assurer une meilleure résistance du support à la torsion.

Pour des raisons de coût, la plaque en aluminium a été choisie plus fine que prévue et renforcée par un panneau en bois. Au final, ce choix ne s'est pas avéré judicieux pour la conservation car le bois est un matériau cellulosique ayant une forte hygroscopie.

Des problèmes de décollement entre le mortier et la plaque en métal ont rapidement été observés. Ils ont sans doute été provoqués par la déformation du bois due aux variations d'humidité. Il a donc été décidé de poursuivre le travail comme prévu à l'origine, avec des plaques en aluminium plus épaisses pour compenser l'absence du renfort en bois.

Comme aucun mortier retenu n'adhère directement au métal, il a fallu rechercher une colle compatible pour la fixation de la plaque au mortier.

Matériel utilisé pour le support

Mortier KEIM Restauro®-Giess; plaque en aluminium plein de 2 mm, Crevoisier-Rérat SA; treillis synthétiques, Matériaux Sabag; film plastique, Hasler; colle multi-usage blanc Coltogum®, Hasler

Méthode de réalisation

Nettoyage du verso

Chaque prélèvement est retourné (verso) puis nettoyé à l'aide d'un jet d'eau à haute pression (Kärcher®) (fig. 132a).

Les morceaux de sous-couches proéminents sont, au besoin, retirés à l'aide de marteaux et de burins. Certains fragments délités sont ajustés à l'aide de petites cales pour remettre à niveau la surface du prélèvement. Les failles et fissures trop larges sont colmatées au préalable avec du sable avant de recevoir la couche de mortier.

Fabrication du support

Un chablon de la forme du prélèvement est ensuite dessiné sur un film plastique (fig. 132b). Il sera utilisé pour la découpe de la plaque en aluminium et du treillis de maintien (fig. 132c,d).

La plaque en aluminium est découpée avec une scie sauteuse puis ajustée sur le prélèvement (fig. 132e,f).

Après avoir été pesé, le mortier est préparé et le revers du prélèvement est humidifié pour permettre une meilleure adhésion du mortier. Le mortier est appliqué une première fois sur la roche en couche liquide pour bien infiltrer les fissures (fig. 132g,h). Une trame de consolidation est ensuite insérée dans le mortier frais, puis une ou plusieurs autres couches successives de mortier plus dense sont ensuite appliquées sur la trame (fig. 132i).

Il est important que les différentes couches de mortier soient correctement mises à niveau pour l'encollage de la plaque en aluminium. Pour cela, cette plaque est appliquée sur le mortier frais pour l'aplanir. L'aluminium n'adhérant pas au mortier, il est

facile de l'enlever une fois celui-ci sec, et de procéder ensuite au collage définitif de la plaque.

Le mortier a une prise de séchage en 48 heures, mais il faut attendre huit jours pour qu'il soit entièrement sec. Toutefois, la plaque de maintien peut être encollée sur le mortier à l'aide d'une colle à base de silicium après 48 heures (fig. 132j). Pour une meilleure adhérence de la colle sur la plaque, puis de la plaque sur le mortier, celle-ci est au préalable poncée en plusieurs points, aux endroits où sera appliquée la colle.

Une fois la plaque en aluminium posée (fig. 132k), il faut attendre quelques heures que la colle ait atteint son plein pouvoir adhésif avant de retourner le prélèvement. Une fois retourné, le poids du prélèvement favorisera l'adhésion de la plaque.

Traitement de la surface

Le tout étant consolidé, la fibre de verre unissant des fragments entre eux peut être retirée, soit à sec, soit avec des coton bâtonnets imbibés d'éthanol pour ramollir la Mowilith® 60 (fig. 132l).

La fibre de verre a été appliquée sur le terrain avec une résine consolidante, la Mowilith® 60. Cette colle forme un film plastique sur la roche après le retrait de la fibre de verre, qui sera nettoyé à l'aide d'un solvant par brossage (fig. 132m). Pour cette opération, nous avons préféré l'usage de l'éthanol, moins volatil et moins toxique que l'acétone.

À la fin de chaque étape, un travail minutieux est réalisé pour nettoyer et ajuster les plus petits fragments. Des collages fins peuvent être faits avec de la Mowilith® 60 diluée à 40% dans de l'éthanol.

Quand le travail sur un prélèvement est terminé, un numéro d'inventaire est inscrit au pinceau avec de la peinture acrylique. Ce type de peinture a été choisi car il est facilement réversible avec de l'éthanol ou de l'acétone (fig. 132n).

Documentation et stockage

Les prélèvements sont photographiés au début du travail pour conserver les données de chantier inscrites sur la fibre de verre. Une seconde prise de vue est effectuée au revers après le nettoyage au jet à haute pression, car la surface sera ensuite recouverte de mortier. Un dernier cliché est également réalisé en fin de traitement avec le numéro d'inventaire.

Au cours du travail, les différentes étapes de traitement sont inventoriées dans un document relatif à la préparation-conservation des prélèvements des sites à traces de dinosaures.

Chaque prélèvement traité de cette manière est disposé sur une palette, qui sera stockée dans un entrepôt sur des étagères de type Schäfer (fig. 132p).

Contraintes de production

Le mortier se travaille idéalement en intérieur à des températures n'excédant pas les 30°C et ne descendant pas en dessous de 5°C.

Le nettoyage de la Mowilith® 60 est un travail fastidieux et nécessite le port d'un masque à solvants.

Le nombre élevé de prélèvements requiert un vaste dépôt et de nombreuses étagères afin d'assurer un stockage optimal et à long terme.

Cas particuliers de conservation et traitement de la couche à traces

Certaines couches à traces ont été prélevées avec une scie à câble (Contraintes – cas particuliers, voir ci-dessus), ce qui a permis d'extraire des dalles beaucoup plus épaisses que les prélèvements dissociés à la main. Par conséquent, la plupart de ces prélèvements ne nécessitent aucun support en mortier. Ceux qui sont trop fissurés reçoivent une fine couche de mortier au revers, sans ajouter de support métallique, afin de pouvoir les manipuler sans dommages. Des consolidations ponctuelles sont effectuées avec de la Mowilith® 60, soit en infiltration, soit par collage.

Il en est de même avec la plupart des petits prélèvements dont la manipulation est aisée. En général, ils ne nécessitent pas de support en mortier et sont uniquement consolidés au besoin (fig. 132o). Les plus fragiles sont parfois conditionnés dans de la mousse noire en polyéthylène taillée à leur forme, pour une meilleure préservation à long terme. La description des traitements appliqués pour les petits prélèvements est inscrite dans le rapport de préparation 240, pour l'essentiel aux chapitres 6.5 à 6.8 (Pfister & Miserez 2014).

Confection d'une coque réversible

Deux prélèvements ont la particularité d'avoir une sous-empreinte visible au revers, ce qui suscite un intérêt scientifique et muséographique particulier et donc une approche de préparation différente. Une des exigences pour la préparation était de consolider la dalle tout en laissant visibles le recto et le verso. Les prélèvements concernés, bien qu'étant de grande taille, ne présentent qu'une épaisseur moyenne de 3cm, ce qui permet une manipulation relativement aisée à deux personnes. De ce fait, il était envisageable de confectionner une coque réversible dont les critères pour le choix du matériau de fabrication étaient les suivants :

- excellente résistance mécanique
- mise en œuvre simple, facilité de manipulation pour le transport, le stockage et l'étude
- stabilité dimensionnelle
- non toxique.

Notre choix s'est porté sur l'Acrystral Prima®, matériau composite s'accordant à toutes nos exigences, sans solvant et très facile à utiliser. Il se présente sous la forme d'un liquide à base de résines acryliques aqueuses et d'une poudre à base de cristaux minéraux.

Matériel utilisé pour la coque

Acrystral Prima®; poudre Basic Crystal; trame en fibre de verre; film plastique; tiges filetées et boulons.

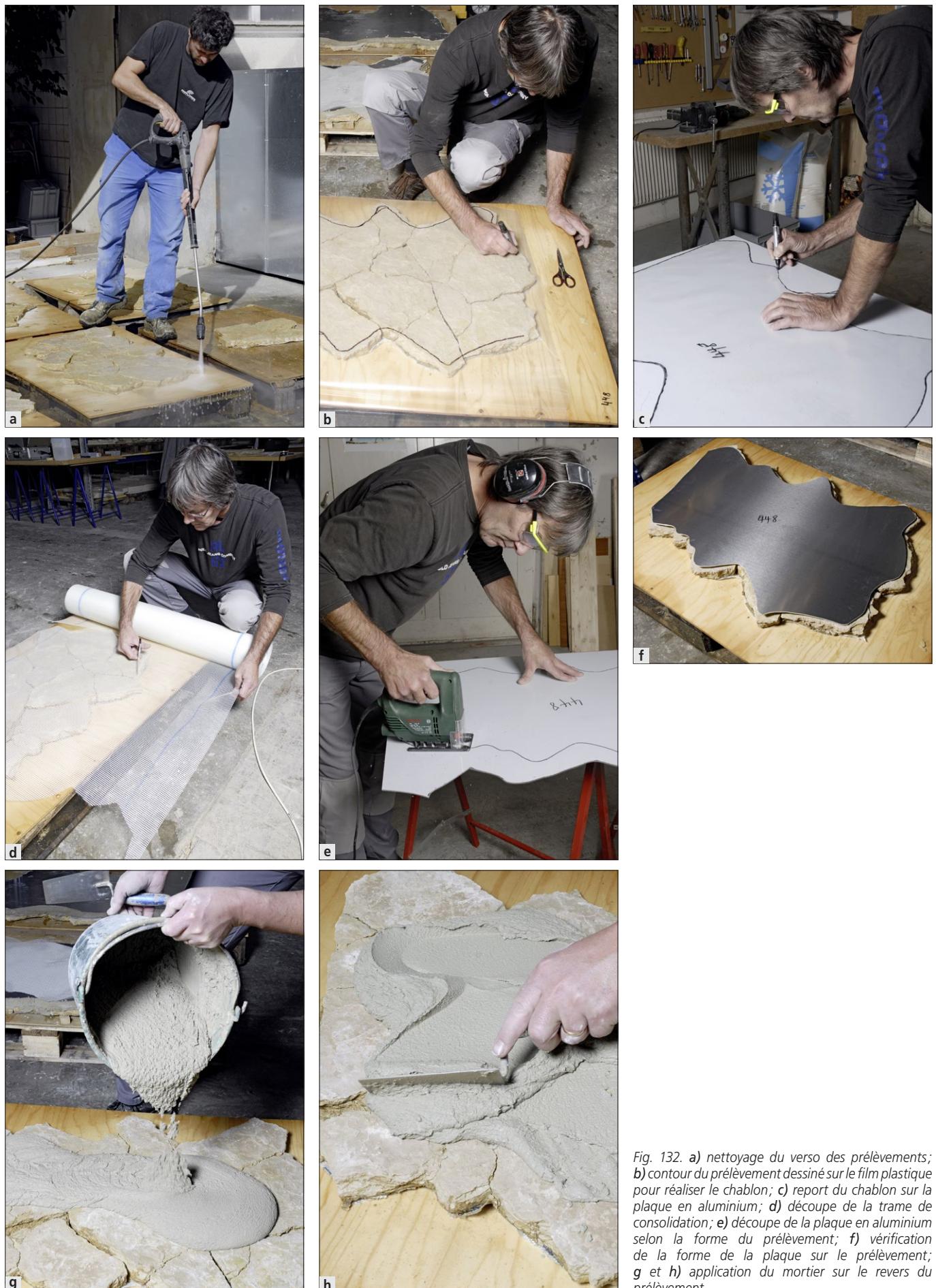


Fig. 132. a) nettoyage du verso des prélevements; b) contour du prélevement dessiné sur le film plastique pour réaliser le chablon; c) report du chablon sur la plaque en aluminium; d) découpe de la trame de consolidation; e) découpe de la plaque en aluminium selon la forme du prélevement; f) vérification de la forme de la plaque sur le prélevement; g et h) application du mortier sur le revers du prélevement.

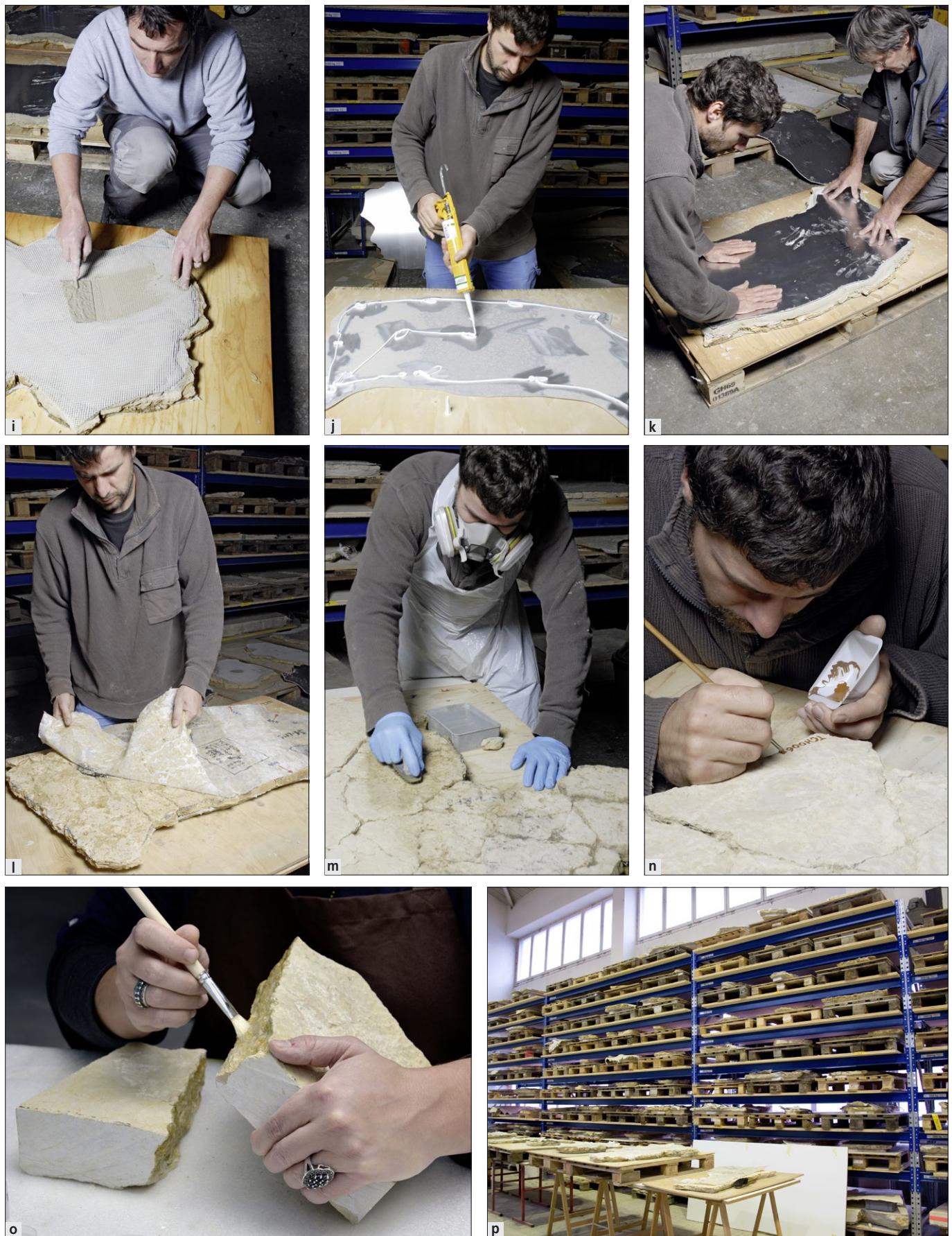


Fig. 132 (suite). i) application de la trame de consolidation sur la première couche de mortier; j) encollage de la plaque en aluminium; k) mise en place de la plaque en aluminium sur le mortier; l) retrait de la fibre de verre; m) nettoyage de la Mowilith® 60 avec de l'éthanol et une brosse; n) marquage du prélevement avec son numéro d'inventaire; o) pour être consolidé, ce petit prélevement ne recevra pas de socle en mortier; une colle est appliquée sur les deux tranches pour les assembler; p) à l'arrière-plan, prélevements entreposés sur des étagères de type Schäfer.

Méthode de réalisation

Un cadre en carton est monté tout autour du prélèvement nettoyé (cf. méthode avec mortier), en veillant à ce qu'il n'y ait aucun interstice entre la roche et le carton (fig. 133a). Les différences de niveau sur la surface de la roche sont comblées avec des coussinets de sable ou de billes d'argile expansée. Il est très important de n'avoir ni creux ni bosses, le démoulage étant sinon impossible. Ensuite, un film plastique est appliqué sur toute la surface du prélèvement pour le protéger et assurer un démoulage facile (fig. 133a). Une trame de renfort en fibre de verre est déposée sur le film plastique (fig. 133b) et le

produit Acrystral® est versé par-dessus. Une nouvelle couche d'Acrystral® est coulée jusqu'à obtenir l'épaisseur désirée. Une fois la coque durcie, après environ huit heures, le prélèvement est retourné.

Pour la confection de la contre-coque, toutes les étapes décrites ci-dessus sont renouvelées, avec une légère différence. Un nouveau cadre en carton est installé autour du prélèvement en conservant un petit espace, comblé par des sachets de sable ou des boudins de plastiline jusqu'au sommet de la coque.



a



b



c



d



e

Fig. 133. a) montage d'un cadre en carton autour du prélèvement et application d'un film plastique sur sa surface; b) application de la trame de renfort sur le film plastique; c) contre-coque terminée et retournée, avec les tiges filetées servant à la fermeture; d) coque et contre-coque ajustées et maintenues entre elles par un boulon; la contre-coque a un bord plus épais que la coque (couvercle); e) coque et contre-coque en Arcystal, avec le prélèvement visible au milieu.

Rempli d'Acrystral®, cet espace servira au système de fermeture des deux coques. Lorsque la contre-coque est terminée (fig. 133c), de l'Acrystral® est ajouté sur le pourtour de la première coque et celle-ci est ajustée pour s'emboîter exactement sur la contre-coque (fig. 133e). Des trous sont ensuite percés de chaque côté pour insérer les tiges filetées (fig. 133d), puis la coque est poncée et refermée avec les boulons. Le durcissement complet de l'Acrystral® est obtenu après 72 heures.

Préparation fine de l'intérieur des empreintes

Pour améliorer la lisibilité des traces après stabilisation du prélevement, les empreintes nécessitent parfois des opérations de

préparation fine. Ces opérations comprennent le nettoyage des peintures appliquées sur le terrain et le retrait des restes de placages (couches supérieures) présents à l'intérieur des empreintes (fig. 134-136). Ce travail minutieux permet de mieux apercevoir les détails anatomiques, par exemple les griffes ou les phalanges, et pourrait permettre, grâce à l'étude scientifique de ces empreintes, de repérer des morphotypes ou encore de définir des ichnotaxons.

Le choix des traitements appliqués et le résultat de tests sont décrits dans les rapports de travail de préparation 216, 234 et 240 (Pfister & Miserez 2014).

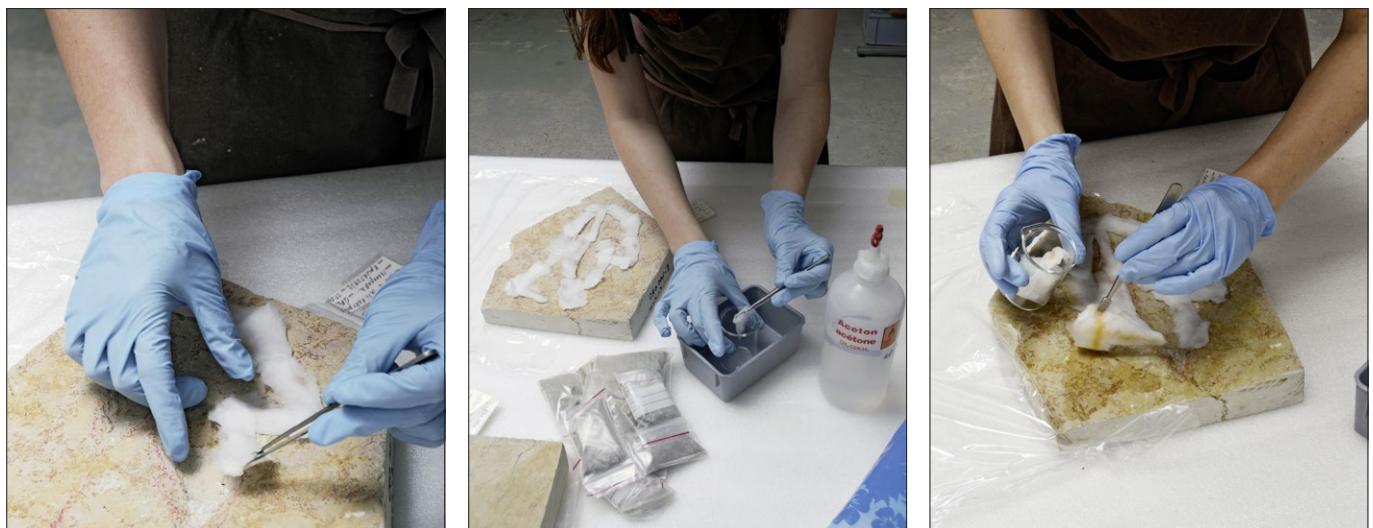


Fig. 134. Application de coton imbibé d'acétone pour enlever les traits de craie grasse qui ont été dessinés sur l'empreinte.



Fig. 135. Retrait de la peinture noire de l'empreinte avec pinceau et acétone.



Fig. 136. Prélèvement avant et après retrait des placages (TCH007-181).

6.3 Plans et figures

6.3.1 Plans synoptiques de surface

La Paléontologie A16 nomme *plan synoptique de surface* la représentation graphique des dessins assistés par ordinateur (DAO). Toutes les empreintes et les pistes de dinosaures, les failles, les limites de couches et le carroyage ont été documentés sur une surface donnée (ichnoassemblage). Tous les relevés de terrain issus de ce type de documentation des sites à traces ont été traités par infographie. Les dessins à l'échelle 1:20 ont donc été numérisés avec une résolution de 200 points par pouce (ppp), en niveaux de gris dans la majorité des cas, ou en couleur pour la vectorisation dynamique (voir ci-dessous).

Les dessins à taille réelle de grand format (monofilms) ont, quant à eux, été traités par une entreprise privée (chap. 6.2.2). Une fois scannés, les relevés, couvrant 4 m sur 4 m au sol, ont été assemblés selon le carroyage des coordonnées locales avant d'être mis à l'échelle de la vectorisation, le 1 : 50, dans un fichier Illustrator. À noter que les plans synoptiques de surface sont systématiquement orientés au nord afin d'en permettre une lecture optimale.

Le traitement des relevés des failles tectoniques est, quant à lui, particulier. L'assemblage des dessins découpés est travaillé au moyen de Photoshop (versions 10 à 15) pour obtenir un document au format TIFF, en mode bitmap. Cette manipulation permet de réduire de manière importante la taille des fichiers. Les failles sont dessinées en noir selon les standards définis, et tous les autres éléments (en-têtes, limites, carroyages, etc.) sont supprimés. Le document est alors importé dans un calque du plan Illustrator des empreintes vectorisées. Le tracé des failles est ensuite modifié pour obtenir une tonalité grise de 15%, rendant la lecture du détail des empreintes plus aisée (fig. 138b).

La majorité des plans a été traitée selon cette première méthode de vectorisation. Des standards de dessin de terrain, puis de vectorisation, ont été élaborés dans ce but (Standards des plans synoptiques de surface, en annexe).

Après expérience, et pour faciliter la compréhension par les dessinateurs en géomatique des différentes lignes constituant les empreintes, une nouvelle méthode d'appropriation des données a été utilisée : la vectorisation dynamique. La spécificité de cette technique réside dans le fait d'utiliser des couleurs distinctes pour différencier tous les types identifiables de structures d'une empreinte lors de la réalisation des dessins originaux (voir ci-dessous). Ainsi, sur les relevés de terrain, la ligne intérieure de l'empreinte n'aura par exemple pas la même couleur que la ligne principale ou qu'un détail anatomique.

Certains plans, vu les conditions particulières de fouille, ont été réalisés par orthophotographie. Cette dernière méthode s'avère très intéressante pour le traitement des sites dont la taille est très importante, comme Courtedoux - Béchat Bovais par exemple.

6.3.1.1 Description des différents calques dans les fichiers Illustrator

Les calques et les groupes ont été organisés de manière à ce que les utilisations ultérieures des documents soient facilitées (fig. 137). Les pistes sont séparées les unes des autres, et les styles de traits de même type, donnant une même information, ont été groupés pour en faciliter la manipulation. À noter, dans certains cas, la présence de calques particuliers comme celui des traces énigmatiques (TE), et ceux indiquant la présence de plans index des mouvements et/ou des prélèvements (index m, index p). Des calques pour l'insertion de notes, d'informations, de compléments, etc., ont été ajoutés selon les besoins des dessinateurs.

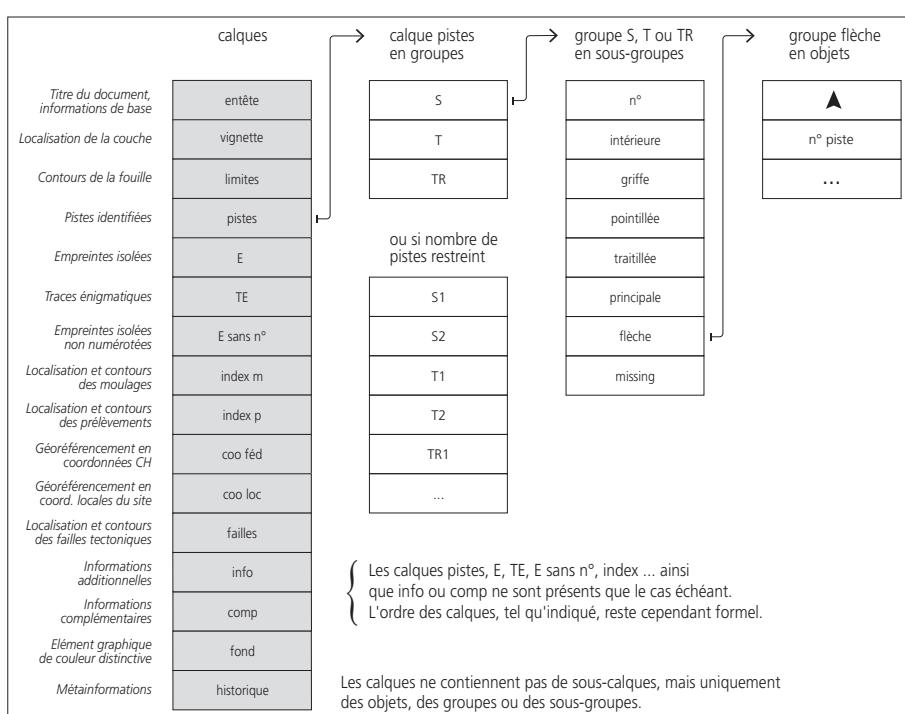


Fig. 137. Schéma de l'organisation des calques dans un fichier Illustrator.

- Les entêtes, schématisés sous la forme d'un cartouche, contiennent les informations générales du plan: le nom du site, les numéros de couche et de secteur, l'échelle et la direction du nord (fig. 138c).
- Les vignettes localisent une couche donnée par rapport à la surface totale de la fouille (fig. 138d).
- Pour les différents types de limites, se référer au document « standard des plans synoptiques de surface » (voir les catalogues *Traces de dinosaures jurassiques*, liasses 1).
- Pour les pistes, les empreintes isolées (E) avec ou sans numéro, et les traces énigmatiques (TE), chaque empreinte est représentée par différents types de lignes (fig. 138a):
 - ligne principale (crête du bourrelet ou pourtour du creux);
 - ligne intérieure (contour réel de l'empreinte);
 - ligne extérieure (limite extérieure du bourrelet);
 - ligne représentant les contours des structures intérieures (détails anatomiques).

Toute empreinte non clairement définie est symbolisée par une ligne principale en traitillé. Les structures non formellement identifiées comme étant des empreintes de dinosaure ou des

figures dignes d'intérêt (ichnologique, sédimentologique) ne sont pas prises en compte, et donc non dessinées.

- Les calques index permettent de localiser les mouvements (index m) et les prélèvements (index p) existants (chap. 6.3.2).
- Les coordonnées nationales suisses (coo féd) – ou coordonnées fédérales – forment un réseau décamétrique cartographié au moyen de croix. Elles sont représentées au moyen d'une croix, dont les segments symbolisent les directions. Le premier chiffre (trait horizontal) équivaut à la position dans la direction ouest-est et le second dans la direction sud-nord (fig. 138e).
- Les coordonnées locales (coo loc) forment un réseau métrique cartographié au moyen de croix. Les coordonnées locales, les coordonnées nationales correspondantes ainsi que l'angle de référence sont mentionnés aux côtés d'un symbole de deux flèches croisées (x, y) indiquant les axes d'orientation du carroyage (fig. 138f).
- Les failles ne sont pas représentées de façon vectorielle. Si elles ont été dessinées sur la plupart des sites, puis scannées de manière identique aux empreintes, c'est un document en format TIFF, en mode bitmap, de 200 ppp, gris 15% qui a été incorporé dans le calque correspondant (fig. 138b).

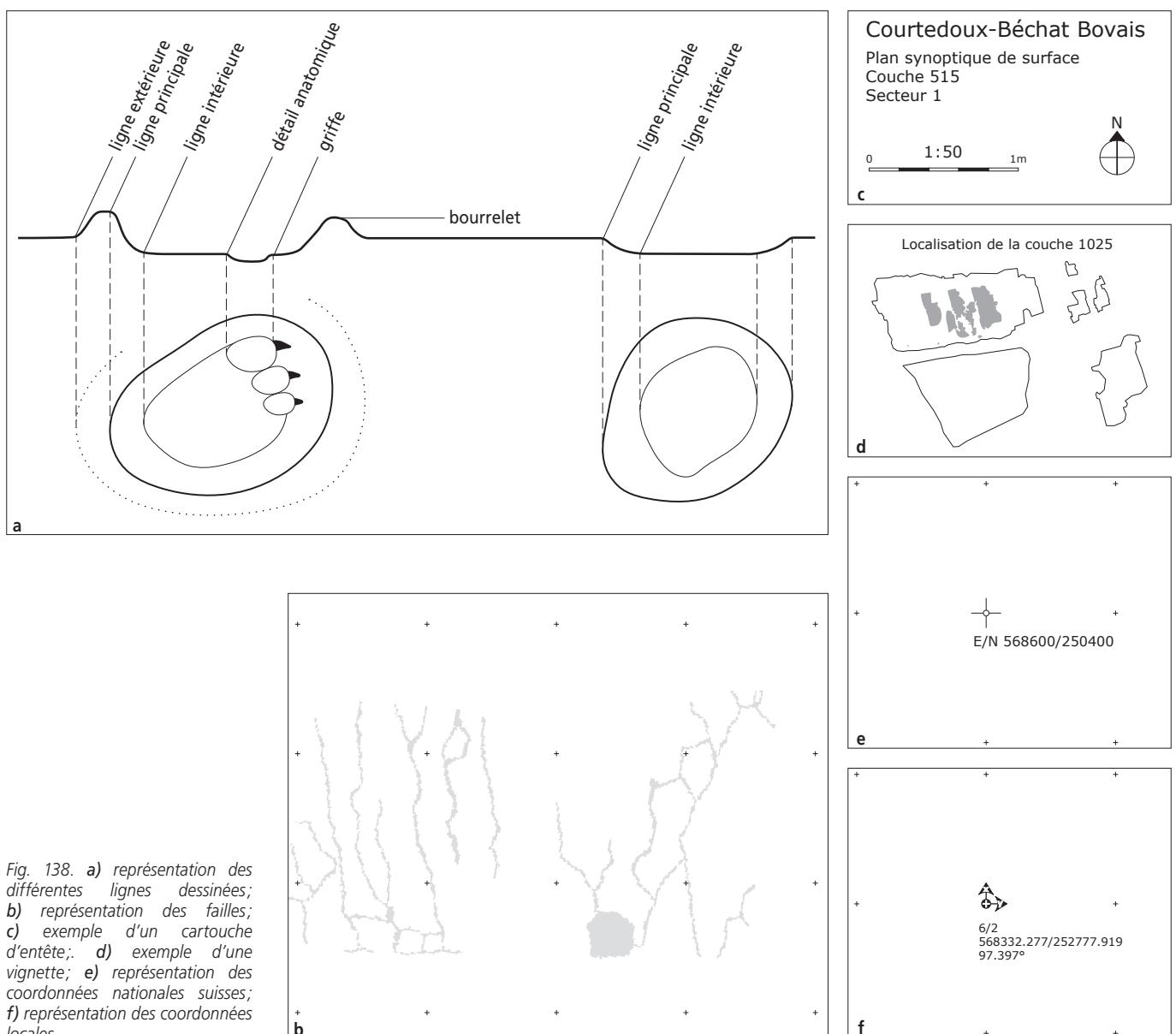


Fig. 138. a) représentation des différentes lignes dessinées; b) représentation des failles; c) exemple d'un cartouche d'entête; d) exemple d'une vignette; e) représentation des coordonnées nationales suisses; f) représentation des coordonnées locales.

- Le fond permet de donner une coloration à la couche représentée. La couleur, choisie arbitrairement, permet d'indiquer de manière distincte la couche que l'on souhaite mettre en évidence. Ce calque est surtout utilisé par les dessinateurs, afin d'éviter d'éventuelles confusions lors du travail sur les plans synoptiques de surface. Cela permet également de vérifier rapidement que les empreintes ont bien un fond transparent, condition indispensable à la lecture des failles (fig. 139).
- L'historique contient toutes les informations et remarques liées à la réalisation du plan : nom des dessinateurs, dates de création et de modification du plan, éléments utilisés, particularités, etc. (fig. 140).

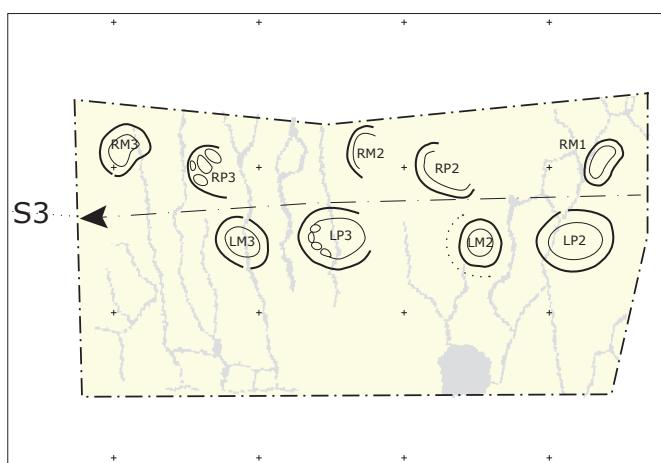


Fig. 139. Extrait d'un plan avec ajout d'une couleur de fond.

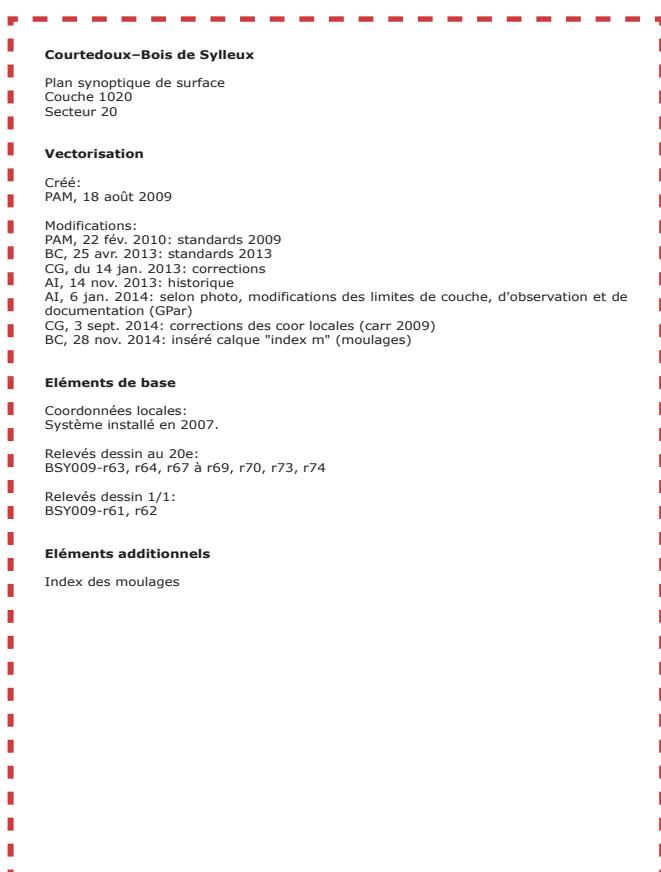


Fig. 140. Exemple d'une fiche relatant l'historique d'un plan.

6.3.1.2 Cas particulier de Courtedoux-Béchat Bovais (CTD-BEB), couche 500

Préparation pour la vectorisation

Une méthode particulière a été utilisée pour le traitement de la couche 500 de Béchat Bovais avant sa vectorisation, puisqu'aucun dessin n'a été produit sur cette couche, vu la taille du site et le manque de temps à disposition.

Ce sont les orthophotos réalisées par l'entreprise Flotron AG, de Gümligen, qui ont été utilisées dans ce but. La mosaïque des orthophotos transmises est définie par quelques dizaines de « tuiles », terme utilisé pour le découpage du plan, et emprunté à l'Office fédéral de topographie swisstopo.

Recadrage

Une fois l'ensemble de la couche photographiée, les images ont été assemblées selon le carroyage fédéral, orienté au nord. Cet assemblage nous a été fourni en trois formats, pour lesquels un pixel correspond à 10, à 5 ou à 2 mm au sol. Ce dernier format, livré en quelques dizaines de tuiles, sera utilisé pour la vectorisation. Chaque tuile couvre une surface exacte de 10 m sur 10 m (image carrée de 1763,89 mm, échelle ~1:5,67, définition 5000 pixels, résolution 72 ppp).

Cet ensemble est alors recadré dans le logiciel Photoshop à l'échelle de vectorisation, soit 1:50. Chaque tuile gardera sa surface au sol de 10m sur 10m, pour une valeur de pixel de 3,175 mm (image carrée de 200mm, définition 3150 pixels, résolution 400 ppp). Le choix du pixel comme unité est préférable pour la précision de ce travail.

Orientation et pendage

Le recadrage des images s'avère trop lourd pour être réalisé en une fois, raison pour laquelle il a été décidé de procéder par zone, délimitées en cinq parties (fig. 141).

L'intégralité des plans synoptiques de surface ayant été vectorisés selon le carroyage local (le fichier étant moins lourd que si l'orthophoto est orientée au nord), il est plus cohérent d'utiliser ici la même trame. Le passage du carroyage fédéral au carroyage local nécessite une rotation de l'image (gisement 52,505°), le carroyage local étant orienté dans l'axe du tracé de l'A16. De plus, le carroyage étant plaqué sur une dalle en pente alors que l'orthophoto visualise sa projection en plan, il conviendra d'étirer cette dernière. Sur l'axe X, le pendage est uniforme ($1,819^\circ \rightarrow 100,050\%$). L'axe Y, cependant, se divise en deux pendages distincts. La zone sommitale (au NW : $3,650^\circ \rightarrow 100,203\%$) a une pente plus faible que les quatre autres zones (au SE : $4,866^\circ \rightarrow 100,362\%$).

Suite à la rotation et à l'extension de chaque zone, il est alors nécessaire de procéder à un découpage précis en tuiles utiles à la vectorisation, en fonction du carroyage local.

Pour réaliser les tuiles utiles à la vectorisation, il convient d'effectuer l'opération suivante à cinq reprises, en fonction du nombre de zones définies (fig. 142) :

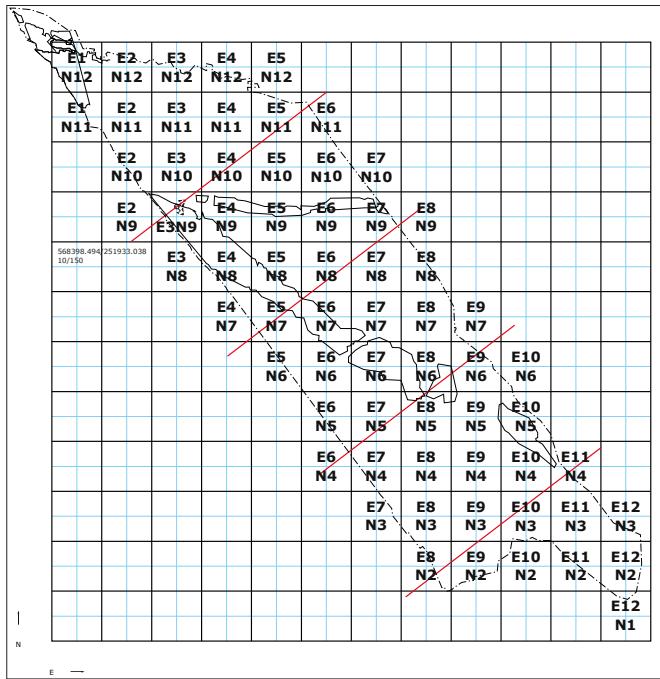


Fig. 141. Courtedoux-Béchat Bovais, couche 500. Plan index des tuiles de l'orthophoto recadrées et renommées (vers l'est et le nord). Représentation des cinq zones délimitées en rouge. Coordonnées nationales suisses.

		X →		
Y ↓		5-15	15-25	
	110-120	110-120		
	120-130	120-130	25-35	
	130-140	130-140	130-140	35-45
	140-150	140-150	140-150	140-150
	150-160	150-160	150-160	35-45
	5-15	15-25	25-35	35-45

Fig. 142. Extrait du plan index des tuiles avec les coordonnées locales.

- assembler dans Photoshop l'ensemble des tuiles touchant une zone (prévoir une taille de document suffisante pour ne rien perdre après la rotation);
- appliquer une rotation horaire de 90° moins le gisement de l'assemblage (= 37,495°);

– étirer l'image pour compenser le pendage en modifiant la taille de l'image en largeur (axe X) et en hauteur (axe Y). Pour ce faire, multiplier les valeurs du document par leurs taux respectifs indiqués plus haut (en pixels);

– recadrer alors le document pour qu'il contienne strictement les futures tuiles de la zone au pixel près (5m → 1575 px, 10m → 3150 px, etc.).

Il s'agit ensuite de placer un repère sur l'axe X (choisir une dizaine, dans la moyenne de son alignement) ainsi que sur l'axe Y. Puis, au moyen du bouton *taille de la zone de travail*, régler d'abord un côté de X et un côté de Y (différences des pixels). Régler ensuite les autres côtés des X/Y et compléter les repères par dizaine de mètres (multiple de 3150 px).

Ce fichier peut servir à extraire la limite d'observation. Pour cela, ouvrir une copie du document, sélectionner le masque noir bordant la dalle au moyen de l'outil *baguette magique*, inverser la sélection et y verser du blanc, puis fermer le document. Afin de conserver le fichier durant toute la vectorisation, il est conseillé de l'enregistrer en format TIFF.

Les deux surfaces unies de ce fichier ouvert avec Illustrator seront facilement transformées en limites;

– il reste enfin à découper les tuiles utiles avec l'outil *taille de la zone de travail* et les valeurs en pixels de celles-ci. Il s'agit d'extraire d'abord une bande, puis les tuiles de cette dernière, chacune enregistrée en format TIFF et nommée d'après ses coordonnées X et Y, et ainsi de suite en revenant avec l'historique.

Après le traitement de la dernière tuile, fermer sans enregistrer afin de ne pas perdre les informations du fichier de base.

La suite de la méthode de vectorisation des données est la même que celle utilisée pour les autres plans synoptiques de surface.

6.3.1.3 Vectorisation dynamique

C'est en observant, à partir d'un lieu situé en hauteur, la couche 515 de Béchat Bovais, sur laquelle certaines empreintes étaient peintes en couleur, que l'idée d'une nouvelle méthode de vectorisation des traces est née. Elle consiste à utiliser un outil proposé par Illustrator, celui de la vectorisation dynamique, permettant la transformation d'une image pixellisée en image vectorielle. Cette action est très rapide, mais nécessite en amont une préparation rigoureuse (relevés de terrain, scannage et traitement de l'image); elle génère aussi, en aval, une quantité de tracés qu'il conviendra de trier.

Quelques tests appliqués à des vectorisations de petites surfaces ont progressivement permis d'affiner la méthode. Ce nouveau procédé requiert l'utilisation d'un code de couleurs appliqué aux relevés de terrain (fig. 143).

Inutile pour la vectorisation en elle-même, le code des couleurs est en revanche nécessaire pour le traitement de l'image ainsi que pour le tri des tracés.

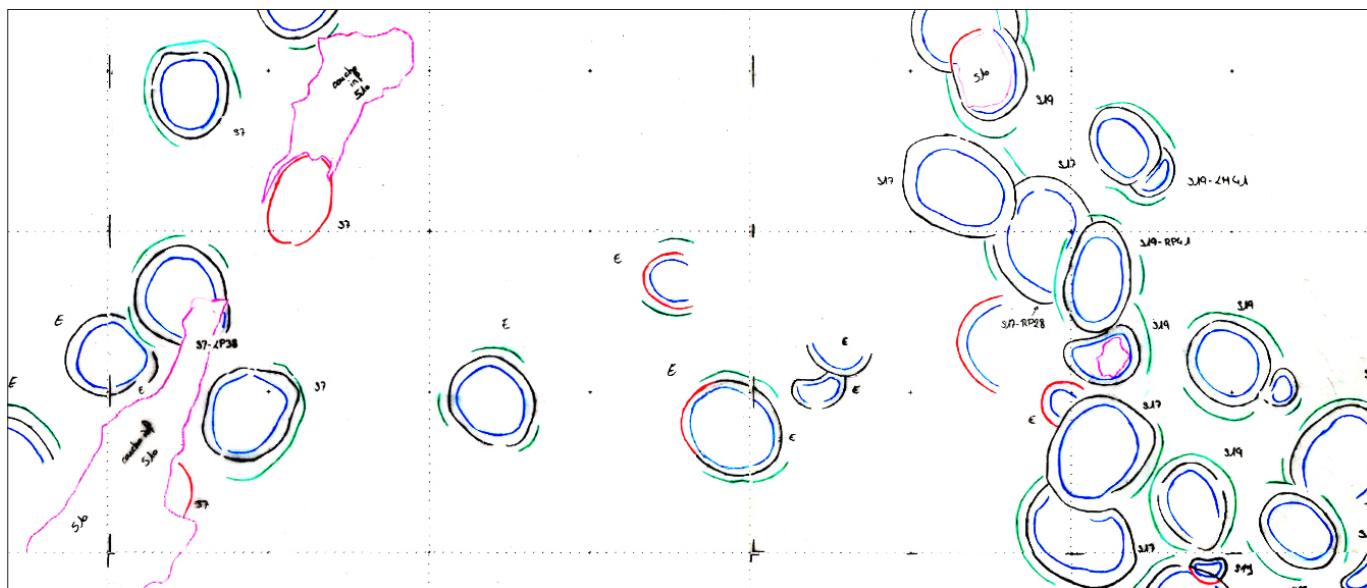


Fig. 143. Courtedoux-Béchat Bovais, couche 515. Extrait du remontage des relevés de terrain à l'échelle 1:20.

Code des couleurs: *ligne intérieure et détails*; *limites*; *ligne principale*; *ligne pointillée*; *ligne traitillée*.

Scannage et traitement de l'image

Les relevés sont scannés selon la procédure habituelle, en prenant une grande attention aux différents paramètres de l'image (luminosité, contraste, etc.) afin d'éliminer au mieux les salissures issues du terrain tout en maintenant la lisibilité du relevé. Chaque relevé, couvrant 4m sur 4m au sol, est alors mis à l'échelle de vectorisation (1:50) grâce à l'outil Photoshop *recadrage avec perspective* (image carrée de 80mm, définition 630 pixels, résolution 200 ppp).

Deux mêmes nouveaux fichiers pouvant contenir la somme des images traitées sont alors créés (définition : multiple de 630 pixels x multiple de 630 x pixels, résolution 200 ppp). L'ensemble des relevés recadrés est incorporé dans le premier de ces fichiers qui va rassembler toutes les données. Ce remontage exhaustif sera utile pour la suite du procédé. Il est vivement conseillé d'utiliser des repères pour cette opération de haute précision.

Les images recadrées dans l'une des étapes intermédiaires sont retouchées pour en définir clairement le dessin (élimination des textes et limites, accentuation des couleurs et uniformisation des tracés), par le truchement de la vaste palette des outils Photoshop. L'assemblage de l'ensemble de ces relevés formera le second fichier créé à dessein. Pour chaque nouvelle image, il convient d'ajuster les bords du dessin avec ceux déjà versés, afin d'harmoniser la future vectorisation en évitant la déformation des traits.

Application de la vectorisation dynamique

L’assemblage retouché est alors importé et activé dans le fichier Illustrator de la vectorisation concernée. Ouvrir la fenêtre *options de vectorisation*.

- Réglage des paramètres:
 - mode: seule l'option *noir et blanc* autorise la vectorisation des contours;

- seuil: agit sur la saturation de la couleur du trait (un seuil trop bas supprimera un trait de faible intensité);
 - atténuation: annule la vectorisation selon l'épaisseur du trait (de 0 px → figure tous les traits, à 20 px → supprime progressivement les traits les plus minces);
 - contours: à cocher;
 - épaisseur maximale du contour: si la valeur est trop petite, un trait trop épais deviendra un objet;
 - longueur minimale du contour: inscrire la valeur minimale (0 px), afin de pouvoir tout vectoriser;
 - tracé ajusté: simplifie le tracé (valeur faible, certains tracés pourront être simplifiés plus tard au besoin);
 - zone minimale: spécifie le plus petit élément de l'image d'origine;
 - angle d'arrondi: spécifie la valeur d'un angle de l'image d'origine considéré comme sommet;
 - trame: *pas d'image* supprime l'image d'origine après la vectorisation. Le remontage exhaustif de l'image y est préférable;
 - vecteur: choisir *résultat de vectorisation*.

- Enregistrement:

- les paramètres étant réglés, il convient de les enregistrer ; nommés *vectorisation traces*, le menu *paramètre prédefini* permettra de les rappeler.

- Vectorisation:

- actionner *vectoriser*, puis *objet/décomposer.../objet*; les commandes produiront la vectorisation de tous les tracés, empilés dans le calque.

Tri et mise aux standards de la vectorisation

Il reste à uniformiser les différents types de tracés en respectant les standards des plans synoptiques de surface. Il est conseillé d'afficher le fichier contenant le remontage exhaustif qui servira de guide. En effet, il sera utile pour sélectionner les types de traits, pour nommer les empreintes et les pistes, ainsi que pour vectoriser les limites de couches et d'observation.

6.3.2 Plans index des prélèvements et des moulages

Des calques particuliers ont été réalisés et intégrés aux plans synoptiques de surface afin de mettre en évidence les zones correspondant aux empreintes de dinosaures qui ont été prélevées ou moulées. Ils permettent à la fois de situer sur le plan les objets prélevés ou moulés, au moyen du numéro d'inventaire correspondant, et de donner une indication sur leur format. Pour faciliter la distinction entre les prélèvements et les moussages, le fond des premiers est coloré en vert, celui des seconds en violet. Les plans index des prélèvements et des moussages sont imprimés séparément, et au même format que les plans synoptiques de surface.

Plans index des prélèvements

Ils ont été conçus uniquement pour les couches comprenant des zones prélevées formant un ensemble qu'il est possible de

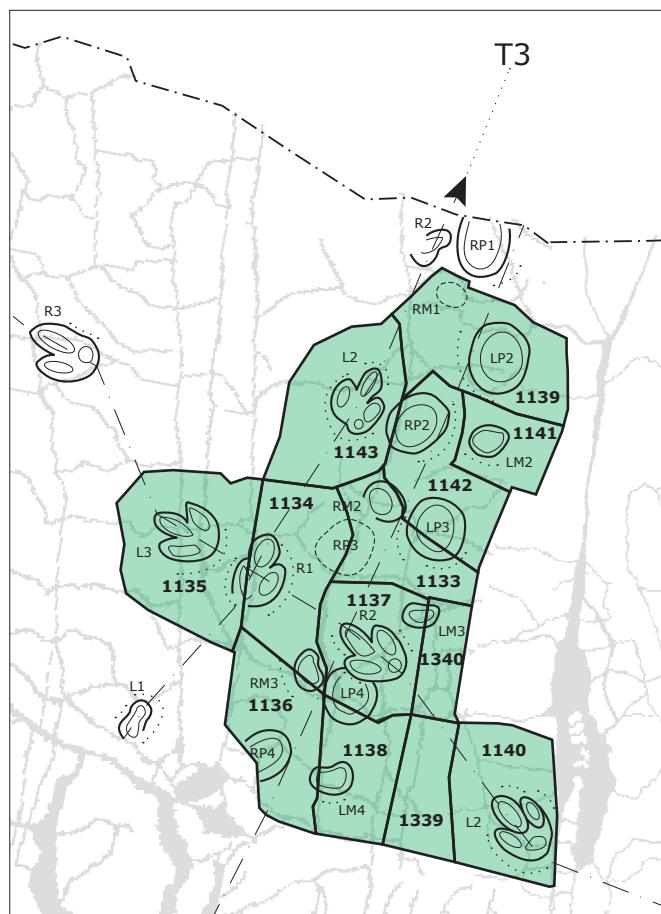


Fig. 144. Extrait d'un plan index des prélèvements.

reconstituer (fig. 144). Si des prélèvements ont été réalisés sur une quarantaine de couches à traces, seules neuf d'entre elles remplissent ces conditions.

La forme des prélèvements n'est pas reproduite à l'identique, les contours étant posés de manière indicative, sur la base des relevés de terrain ou par un simple rectangle. L'année durant laquelle les prélèvements ont été extraits du terrain est reportée dans le cartouche de chaque plan index; lorsqu'il existe une possible confusion entre deux numéros d'inventaire, ceux-ci sont accompagnés de leur code (site et année).

Plans index des moules

Contrairement aux prélèvements, les moulings ont tous été représentés sur les plans (fig. 145). La forme des tirages reproduite sur les plans l'a été de manière précise grâce aux photographies des objets, par décalquage de leur contour sur les plans synoptiques de surface.

Sur le plan, les tirages sont identifiés au moyen de leur numéro d'inventaire comprenant le code et le numéro du tirage, précédés de la lettre *r* indiquant qu'il s'agit d'un relevé.

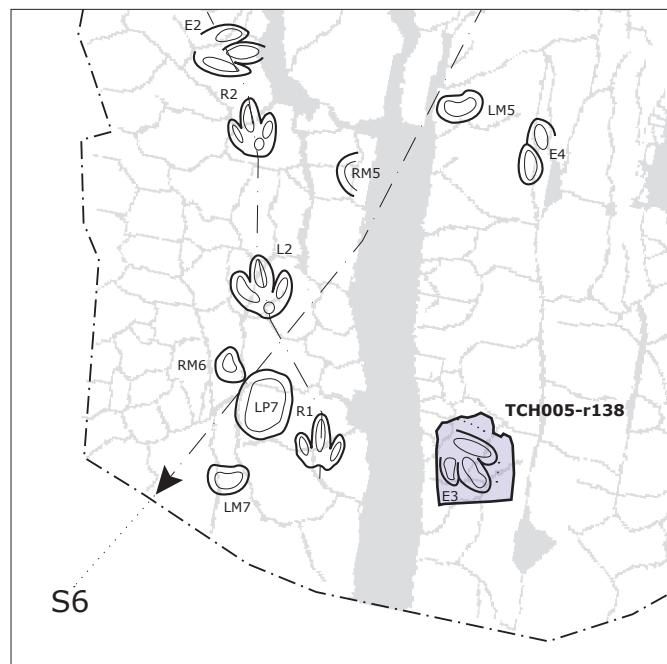


Fig. 145. Extrait d'un plan index des moulages.

6.3.3 Méthode pour isoler les pistes

Toutes les pistes de sauropodes ou de tridactyles ont été isolées à partir des plans synoptiques de surface standardisés (abrégés *plans sy-su*) et ont fait l'objet de dessins individualisés. L'objectif de cette démarche est la mise en évidence de chaque piste, afin d'en faciliter la lecture parmi les autres éléments du plan que sont les pistes de dinosaures, les empreintes isolées et les failles. Pour ce faire, des standards graphiques ont été établis afin de garantir une uniformité des dessins (annexe 2).

Chaque piste à isoler est orientée verticalement dans le sens de la marche, depuis le bas vers le haut, et est représentée avec son environnement d'origine. Les plans sont à l'échelle 1:50. Les pistes contenant des empreintes de taille réelle inférieure à 25 cm sont dupliquées et redessinées en parallèle dans une forme condensée sur le même dessin, mais à l'échelle 1:20. Cela permet de rendre visibles des détails sur les empreintes ne pouvant être représentés à une échelle supérieure (fig. 146). Les outils informatiques utilisés pour travailler ces dessins sont les logiciels Adobe Illustrator et Photoshop CS5.

Il s'agit tout d'abord de préparer le procédé à partir des plans synoptiques de surface, en réalisant des plans intermédiaires :

- dans le répertoire du site, créer un nouveau dossier nommé *pistes isolées*, puis un sous-dossier nommé *site_couche* pour chaque couche contenant des pistes à isoler ;
- enregistrer une copie du fichier *plan sy-su* de la couche concernée dans le nouveau sous-dossier correspondant ;
- renommer le fichier copié en *site_couche_intermédiaire* ;
- ouvrir le fichier et le modifier pour pouvoir ensuite isoler plus rapidement et plus facilement toutes les pistes de la couche ;
- préparer, enregistrer un fichier intermédiaire pour chaque couche.

On peut ensuite isoler les pistes à partir des plans intermédiaires :

- enregistrer une copie du fichier *plan_intermédiaire* de la couche concernée dans le même dossier ;
- renommer le fichier copié en *site_couche_piste* en fonction du numéro de la piste à isoler ;
- ouvrir le fichier et isoler la piste concernée ;
- enregistrer puis fermer le fichier *site_couche_piste* ;
- quand toutes les pistes d'une couche ont été isolées, déplacer le fichier *plan_intermédiaire* dans le répertoire prévu à cet usage.

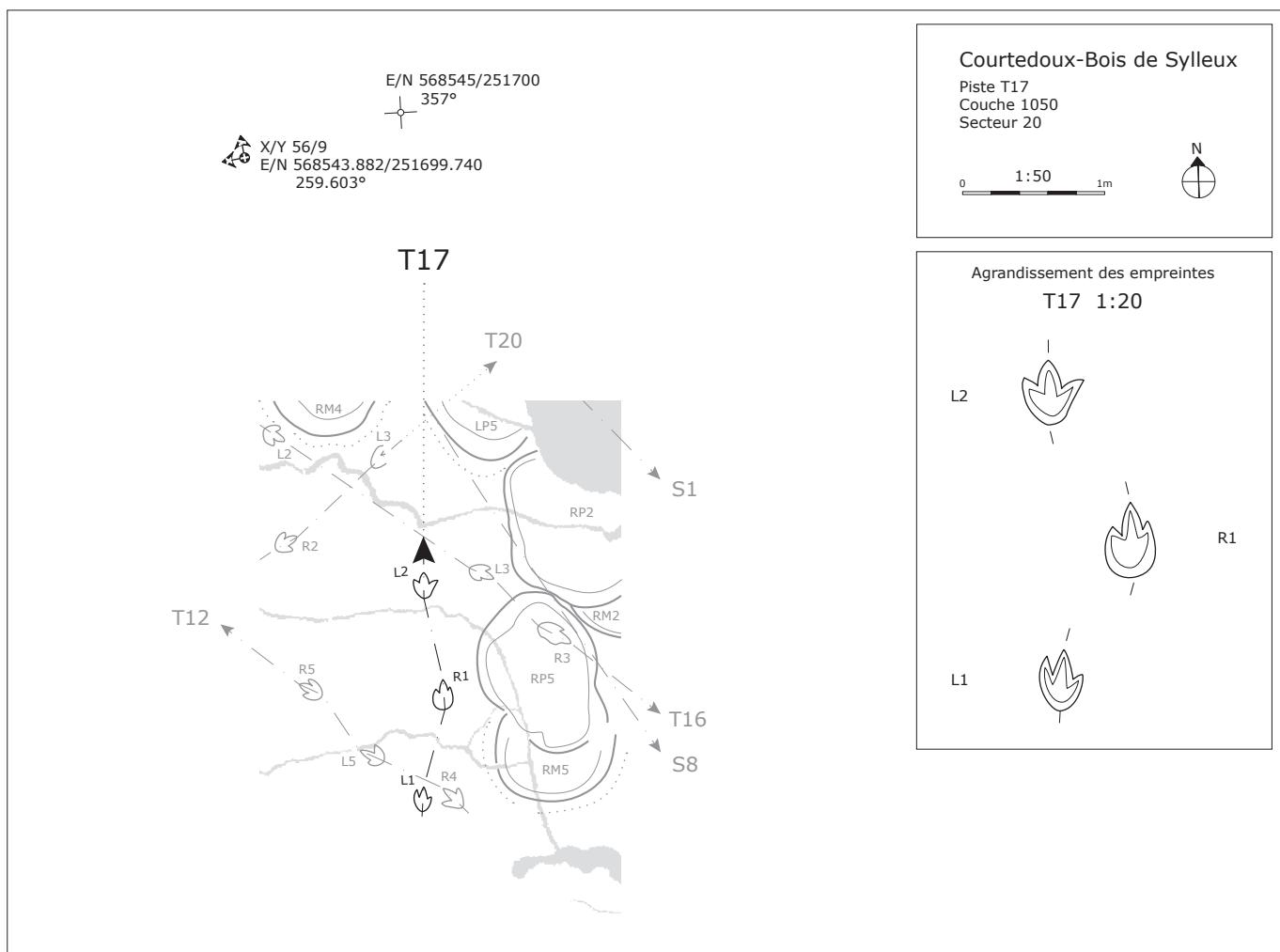


Fig. 146. Courtedoux-Bois de Sylleux: exemple d'une piste qui a été isolée, avec le détail des empreintes au 1:20.

6.3.4 Orientation, longueur et direction des pistes

Une piste de dinosaure peut être droite ou présenter des virages plus ou moins prononcés. Sa direction peut donc changer à chaque pas du dinosaure. Sur les « plans de direction », elle est représentée par une ligne qui donne un aperçu de son tracé général (voir ci-dessous). Les orientations d'une piste correspondent aux azimuts de cette ligne, mesurés et exprimés en degrés par rapport au Nord géographique. Chaque piste est unique et présente des spécificités individuelles. La difficulté pour déterminer les orientations de plusieurs pistes consiste à mettre en place une méthode applicable au plus grand nombre de cas.

Mesure des orientations

La méthode définie prend en compte trois orientations principales à déterminer pour chaque piste (fig. 147) (annexe 3) :

- orientation E : angle d'entrée de la piste dans la zone observé ;
- orientation D : angle de la ligne directe, qui indique l'orientation générale de la piste ;
- orientation S : angle de sortie de la piste hors de la zone observée.

Pour obtenir ces trois orientations, la méthode mise au point comprend la construction initiale d'une ligne médiane pour chacune des pistes. Celle-ci est établie en reliant les points de référence (intersection entre longueur et largeur) des empreintes d'une même piste les uns aux autres de façon alternée avec des segments de liaison, puis en joignant les milieux de ces segments.

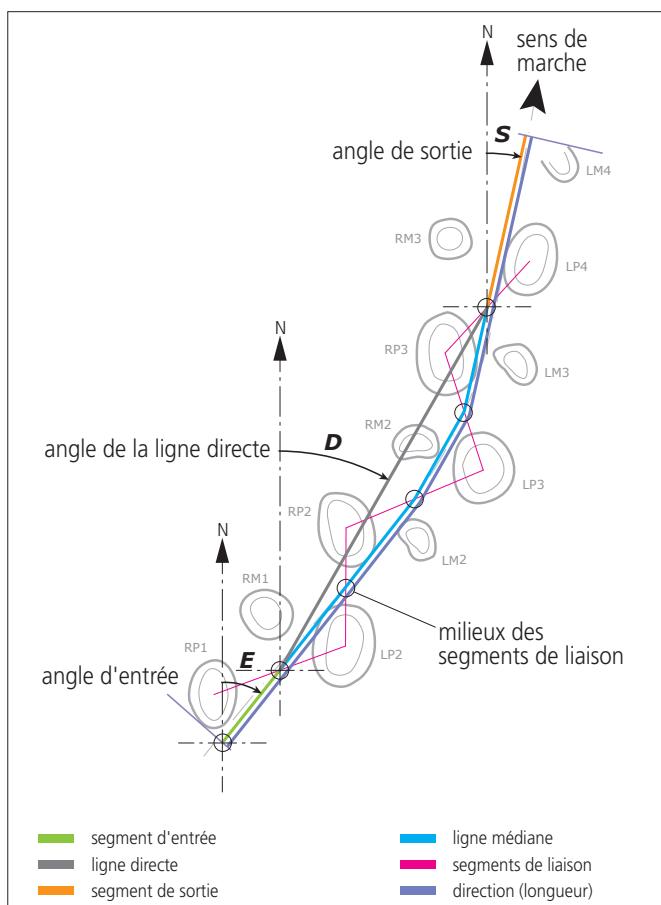


Fig. 147. Figure explicative pour le calcul des orientations, avec pour exemple une piste de sauropode.

La ligne médiane est prolongée de part et d'autre par un segment d'entrée et un segment de sortie, pour former la ligne qui représentera la direction de la piste sur le plan (fig. 147).

Le segment d'entrée s'obtient en prolongeant le premier segment de la ligne médiane jusqu'à la tangente externe perpendiculaire à la première empreinte. La même opération est effectuée pour obtenir le segment de sortie, en prolongeant le dernier segment de la ligne médiane jusqu'à la tangente externe perpendiculaire à la dernière empreinte. La ligne directe relie les milieux du premier et du dernier segment de liaison.

Pour construire les lignes médianes des pistes, seules les empreintes de pieds sont considérées, sauf dans certains cas particuliers. Les exceptions concernent des pistes pour lesquelles les pieds n'ont pas été observés, ou les débuts et fins de pistes pour lesquelles seules les mains sont visibles. Pour les quelques pistes concernées, si les mains n'étaient pas prises en compte, les lignes médianes seraient biaisées ou n'existeraient pas.

Dans cette méthode, l'orientation correspond à l'angle – exprimé en degrés – formé entre la direction d'un segment de piste (entrée, directe ou sortie) et la direction de référence, le Nord géographique. L'outil informatique utilisé pour mesurer ces différentes orientations ainsi que la longueur des pistes est le logiciel Illustrator. Les valeurs relevées en degrés dans Illustrator sont ensuite reportées manuellement dans un tableau Excel. Dans Illustrator, le point de référence 0° se situe sur l'abscisse, en direction de l'est. Les valeurs saisies sont donc converties dans le tableau Excel par une formule mathématique en orientations à partir du Nord géographique (de 0° à 359°).

L'ensemble de ces valeurs est rassemblé dans les fichiers Excel, les fichiers statistiques des paramètres et la base de données de pistes (chap. 6.1.5, 6.1.6 et 6.1.7). L'orientation des lignes directes est également utilisée pour créer les rosaces (chap. 6.3.5).

Mesure de la longueur

La longueur d'une piste est calculée en mesurant bout à bout le segment d'entrée, la ligne médiane et le segment de sortie (fig. 147) (annexe 3). Comme pour les orientations, la valeur obtenue pour la longueur de la piste est inscrite dans les fichiers Excel, la base de données et les fichiers statistiques des paramètres de pistes.

Plans de direction

La première phase nécessaire à la création des plans directionnels est la construction des lignes médianes de chacune des pistes (voir ci-dessus et annexe 4). Ces lignes médianes sont ensuite transposées dans un nouveau fichier Illustrator et celui-ci est retravaillé pour obtenir au final un plan de chacune des couches avec les directions générales des pistes. Pour mieux les différencier, les pistes de théropodes sont représentées avec une ligne traitillée verte, et les pistes de sauropodes avec une ligne continue violette (fig. 148).

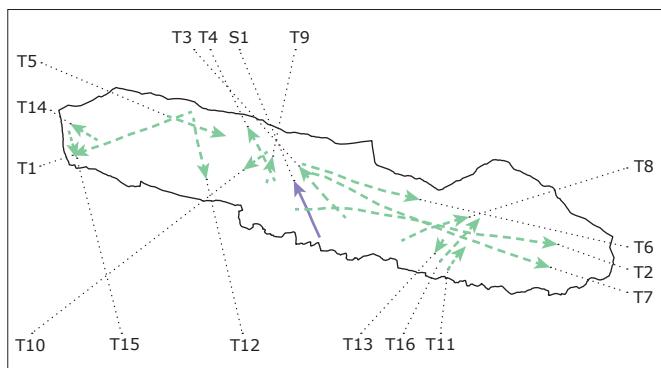


Fig. 148. Chevenez-Crat: exemple de plan de direction des pistes (couche 500).

La réalisation des plans directionnels pour les pistes de dinosaures a pour objectif de visualiser d'une façon claire et sur une seule page, toutes les directions des pistes qui se trouvent sur une couche. La représentation graphique des directions sur les plans, couplée aux orientations intégrées dans des rosaces directionnelles, offrent une base de travail pour étudier les rapports des pistes entre elles dans un espace en deux dimensions (chap. 6.3.5).

6.3.5 Rosaces de direction

Les besoins de l'étude, ainsi que la volonté de présenter visuellement d'une façon homogène et simple les orientations des pistes de dinosaures, ont poussé à la conception de rosaces (fig. 149). Ces diagrammes sont complémentaires des plans de direction (chap. 6.3.4).

Suite aux tests négatifs d'une série de programmes libres sur Internet, le logiciel payant Oriana de la société KCS a été sélectionné. Ses multiples possibilités techniques et graphiques,

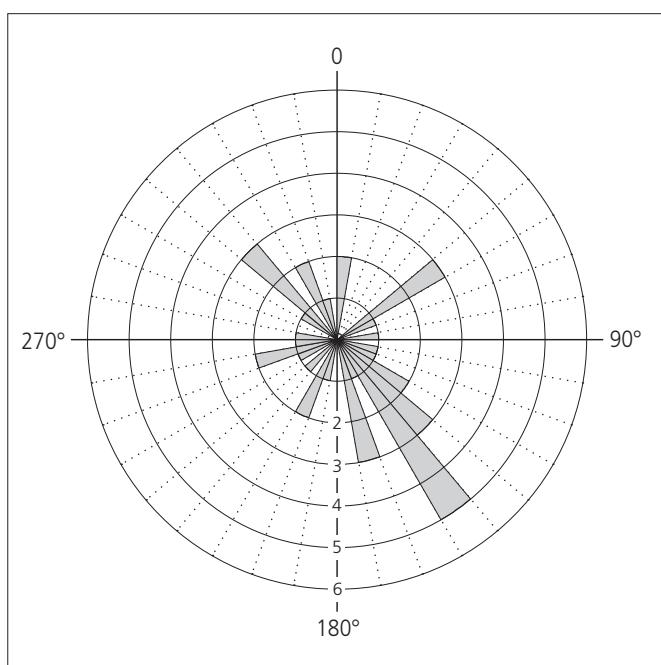


Fig. 149. Courtedoux-Bois de Sylleux: exemple de rosace de direction des pistes (couche 1050).

sa simplicité d'utilisation ainsi que son prix raisonnable ont conduit à l'achat d'une licence de ce produit. Les graphiques obtenus sur la base des données sélectionnées peuvent ainsi être mis en comparaison avec les plans Illustrator et renseigner efficacement sur le nombre et l'orientation des pistes.

L'azimut retenu pour la conception des diagrammes correspond à l'angle que forme la ligne directe par rapport au Nord géographique (chap. 6.3.4). Cet azimut est repris tel que mesuré sur les plans Illustrator, sans tenir compte du pendage de la couche, qui est négligeable. Un calcul comparatif entre l'azimut de la ligne directe en pendage et celui remis à plat a démontré une différence inférieure à un degré. Les valeurs utilisées étant arrondies au degré, cette correction n'a donc pas été prise en compte dans la conception des rosaces.

À partir du fichier général Excel contenant toutes les données d'orientation des pistes mesurées sur les plans Illustrator:

- trier les données voulues parmi les sites et les couches;
- extraire une colonne *Piste* avec les numéros des pistes et une colonne *Nom du site* avec les azimuts en degrés des lignes directes de chaque piste;
- copier et coller les valeurs de ces deux colonnes Excel dans le bloc-notes;
- enregistrer un fichier .txt avec la variable *Tabulation* comme séparateur de colonnes.

Créer les rosaces avec Oriana:

- importer le fichier .txt désiré (vérifier la répartition des données et les noms des deux colonnes) → ok;
- créer le diagramme:
 - dans l'onglet *Main* sélectionner l'option *Rose*;
 - dans l'onglet *Options* sélectionner l'option *Statistics* → *Mean = 95%* → ok;
 - si désiré, pour obtenir une séparation en couleur des valeurs, choisir dans l'onglet *Select* la variable *Raw* et l'option *Subgrouping* → *none*;
- dans l'onglet *Main* sélectionner l'option *Stacked Rose* → ok;
- exporter le diagramme au format .wmf → enregistrer;
- enregistrer le fichier au format .ori pour une éventuelle reprise ultérieure de ces données;
- importer les fichiers .wmf dans Illustrator pour mise aux standards de publication.

Deux types de diagrammes ont été réalisés de manière systématique: par site et par couche. Les diagrammes par site consistent en trois types de graphiques: un premier avec toutes les couches et toutes les pistes confondues, un second composé de toutes les pistes de sauropodes et un troisième pour celles de théropodes. Un graphique supplémentaire a été ajouté pour les quelques pistes de tridactyles.

Les diagrammes par couche consistent en un premier graphique présentant toutes les pistes de dinosaures, un second les pistes de sauropodes et un troisième celles de théropodes. Comme pour les diagrammes par site, un graphique supplémentaire est ajouté pour les pistes de tridactyles.

6.3.6 Histogrammes

Afin d'étudier la distribution de la variabilité des tailles des traces de dinosaures selon les couches, la longueur moyenne des empreintes des pattes arrière (en cm) a été représentée sous forme d'histogrammes.

La conception de ces histogrammes a été réalisée à l'aide de l'*Utilitaire d'analyse Histogramme d'Excel 2013*. Ces histogrammes ont ensuite été repris dans Illustrator et adaptés à la ligne graphique des catalogues.

Tout d'abord, les valeurs de la taille moyenne des empreintes des pattes arrière ont été extraites de la base de données (chap. 6.1.6) pour l'ensemble des pistes et des couches de tous les sites. Ensuite, ces valeurs ont été réparties dans deux tableaux Excel :

- pour les empreintes de sauropodes (S) ;
- pour les empreintes de théropodes et de tridactyles (T+TR).

Dans chacun de ces tableaux, les données ont alors été filtrées par site et par couche, et enregistrées dans des fichiers Excel individuels (par site, couche, S ou T+TR). Dans chacun de ces fichiers, les valeurs obtenues ont été classées par ordre croissant de la plus petite à la plus grande taille pour former la *Plage d'entrée*. En parallèle à cette plage, une échelle de répartition a été ajoutée pour former la *Plage des classes* (fig. 150). Cette échelle de répartition correspond aux écarts entre la plus petite et la plus grande taille des empreintes, répartis et arrondis centimètre par centimètre. Ces deux plages de valeurs ont alors été traitées avec l'*Utilitaire d'analyse Histogramme d'Excel* et représentées sous forme d'histogrammes.

Les graphiques ainsi obtenus ont ensuite été importés dans Illustrator pour y être mis en forme. Dans Illustrator, sur les histogrammes finaux, les empreintes ont été classées et nommées par catégorie selon leur taille (fig. 76). Chaque fichier Excel et Illustrator a fait l'objet d'un fichier informatique individuel.

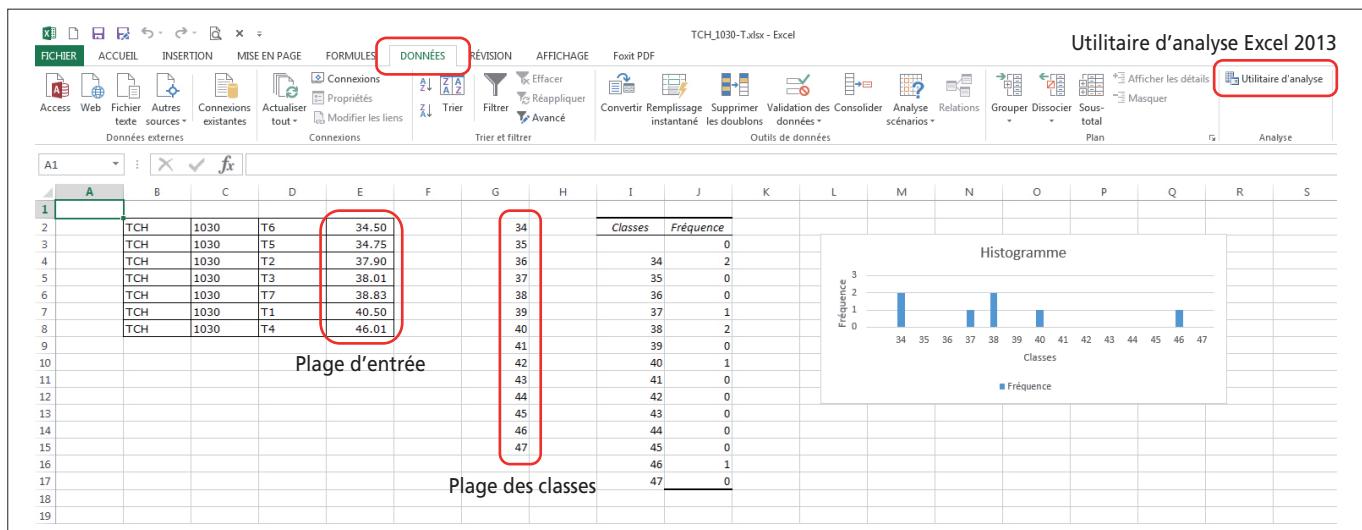


Fig. 150. Capture d'écran dans Excel présentant les Plages d'entrées et les Plages des classes.

6.4 Documentation multimédia

6.4.1 Prises de vues systématiques des pistes et des empreintes

Pour chaque site, une documentation photographique la plus complète possible est réalisée pour toutes les couches fouillées. Chaque piste est ainsi photographiée dans son ensemble et chaque empreinte individuellement. Certaines contraintes techniques, voire un manque de temps, ont parfois empêché d'effectuer la totalité de la démarche. Les prises de vues sont en général orientées de façon à ce que le sens de la marche de l'animal aille du bas vers le haut de l'image. Chaque empreinte, groupe d'empreintes, piste ou portion de piste est photographié une fois avec jalon, plaquette et indication du nord, et une fois sans. La plaquette comporte les indications suivantes : code du site, année, couche, secteur, numérotation de piste et d'empreinte (fig. 152a).

Pistes

Dans la plupart des cas, une piste est photographiée depuis le point de départ de la numérotation des empreintes, en perspective. Cela présente l'avantage de la montrer dans le contexte général mais aussi l'inconvénient d'occasionner une déformation et de ne pas permettre de bien discerner les empreintes les plus éloignées. Il est donc nécessaire de se placer en position la plus élevée afin de pouvoir distinguer la piste dans son ensemble, avec le moins de distorsion possible (fig. 152a). L'idéal serait de pouvoir se positionner à l'exacte verticale de la piste et en son centre mais ceci est quasi irréalisable à partir du moment où elle comporte plus de quatre empreintes, ce qui constitue la majorité des cas. Pour indiquer avec précision le cheminement de certaines pistes, une autre méthode consiste à photographier une première fois la piste depuis un point fixe (trépied ou appareil photo fixé sur une

échelle), puis effectuer une seconde prise de vue identique avec des objets disposés sur chacune des empreintes, pour les repérer. Les deux images sont ensuite superposées, permettant ainsi de localiser précisément chaque empreinte de la piste (fig. 151).

Portions de piste

Les prises de vues de portions de piste offrent évidemment une meilleure qualité, moins de déformation et davantage de netteté mais nécessitent plus de temps. Elles sont complémentaires des photographies de pistes car elles n'indiquent pas le parcours général de celles-ci. Les portions successives sont photographiées avec une superposition d'une paire d'empreintes (pied/main) entre la précédente et la suivante (fig. 152b).

Empreintes individuelles

Pour les prises de vue des empreintes à l'unité ou par paire, le photographe se place, si possible, à la verticale du sujet et à une distance suffisamment grande pour permettre l'utilisation de la plus grande focale afin de diminuer au maximum les déformations (fig. 152c). Pour avoir une lumière naturelle rasante pouvant donner une bonne idée du relief de l'empreinte, les prises de vues matinales ou de fin de journée ont été privilégiées. L'idéal étant de compléter ce type d'images par une prise de vue de la même empreinte avec une lumière voilée à l'aide d'un drap tendu ou par temps nuageux en faisant attention, dans ce cas, aux problèmes de balance des blancs. Le soleil au zénith est une très mauvaise lumière. Les prises de vues nocturnes avec éclairage artificiel offrent une maîtrise totale du couple ombre/lumière (fig. 153).

Dans la mesure du possible, chaque empreinte numérotée est photographiée, qu'elle fasse partie d'une piste ou qu'elle soit isolée. Dans certains cas cette démarche n'a pu être effectuée en raison de contraintes temporelles ou météorologiques.

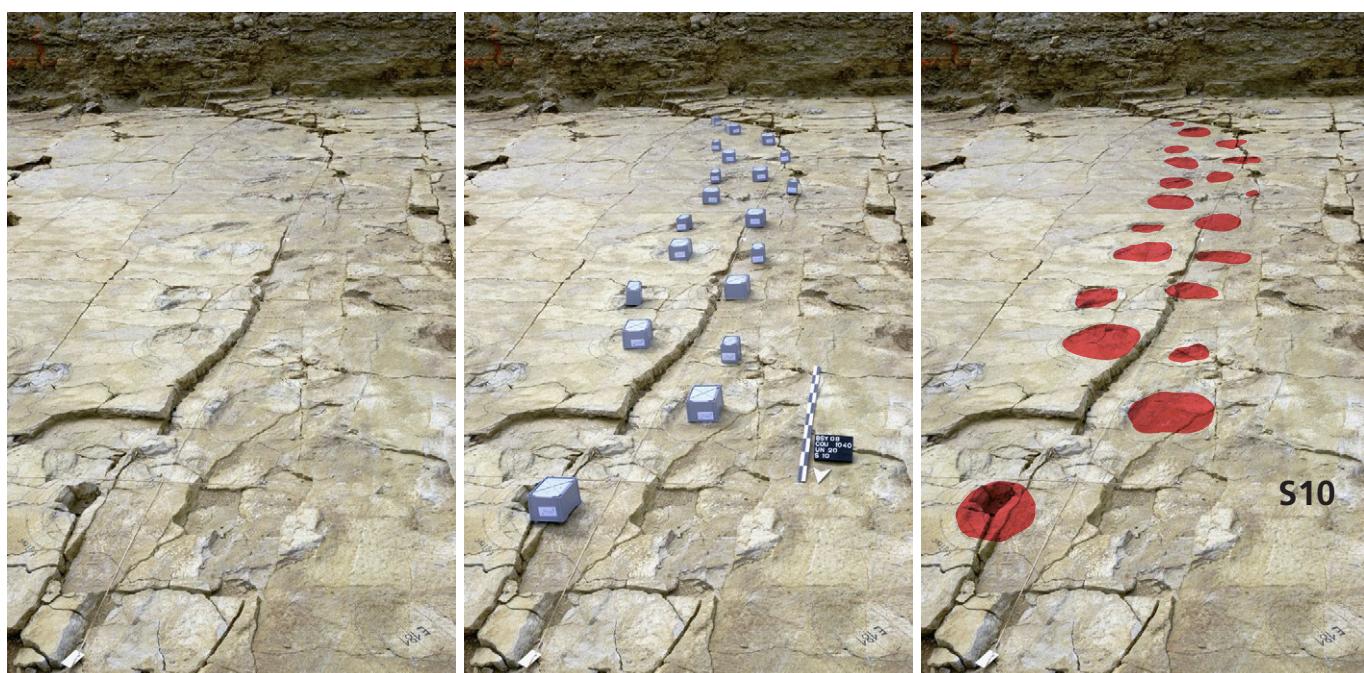


Fig. 151. Repérage des empreintes.

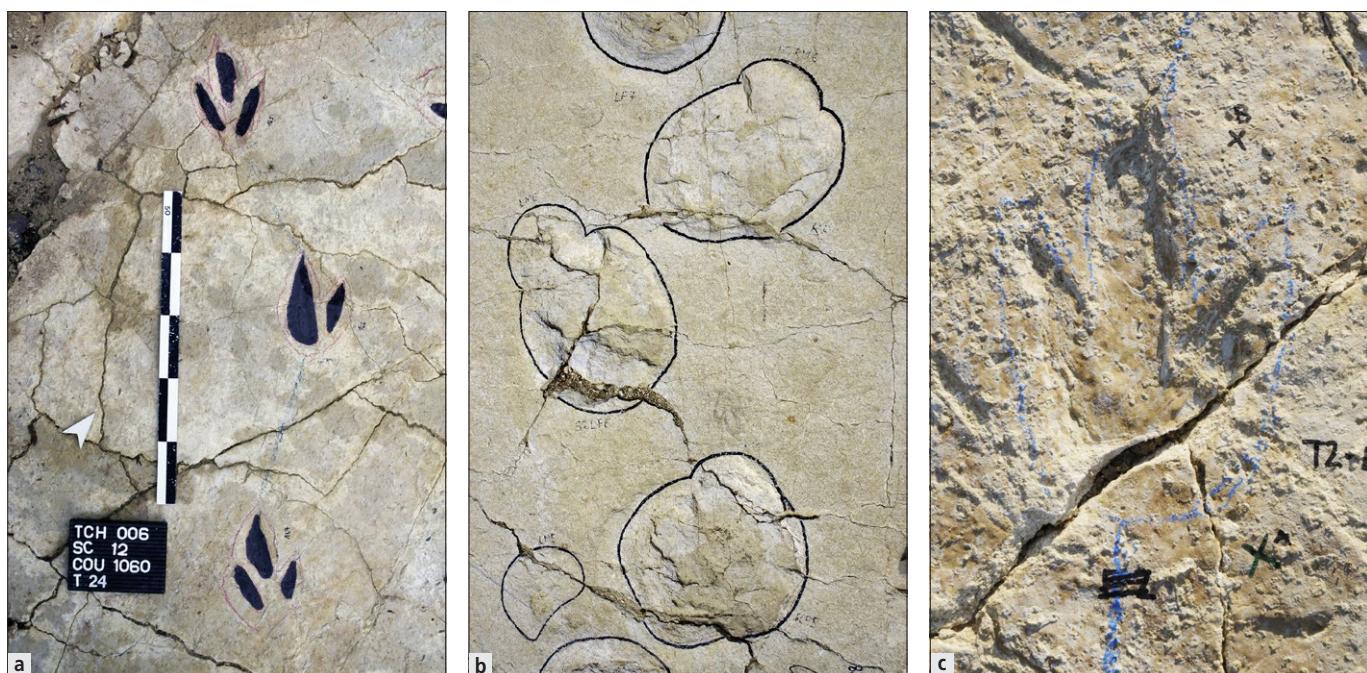


Fig. 152. a) prise de vue à la verticale d'une piste avec jalon, plaquette et indication du nord; b) portions de piste; c) prise de vue standard d'une empreinte.



Fig. 153. Prises de vues nocturne et diurne d'une même empreinte.

6.4.2 Photomontages

Orthophotos

Dès le moment où elles excèdent une certaine dimension et selon les conditions, les surfaces photographiées seront déformées par l'optique de l'appareil photo; c'est pourquoi il faut parfois recourir à des assemblages de petites unités photographiées à leur exacte verticale pour obtenir le résultat le plus proche de la réalité.

La réalisation d'orthophotos nécessite la mise en place d'un carroyage précis (si possible topographié), installé sur la surface à documenter. Des unités de surface de 1 m² sont adéquates si l'on dispose d'une potence ou d'un autre moyen d'effectuer les prises de vues à une distance suffisante pour que la focale utilisée soit au minimum de 50 mm. Elles doivent être réduites ($\frac{1}{4}$ de m²) si les photographies sont faites à hauteur d'homme. Les angles de chaque unité doivent être marqués d'indicateurs (croix, points, billes de sages, etc.) de couleur facilement identifiable sur la surface à photographier (blanche ou fluorescente). Le nord et les coordonnées de chaque unité (A1, A2, etc.; B1, B2, etc.) sont indiqués à côté, de façon à être visibles sur chaque prise de vue.

Par la suite, les images sont recadrées avec Photoshop; l'option *perspective* de l'outil *recadrage* est cochée et des dimensions prédefinies mettent l'assemblage à l'échelle. Il ne reste plus qu'à juxtaposer les images ainsi obtenues (fig. 154 et 155).

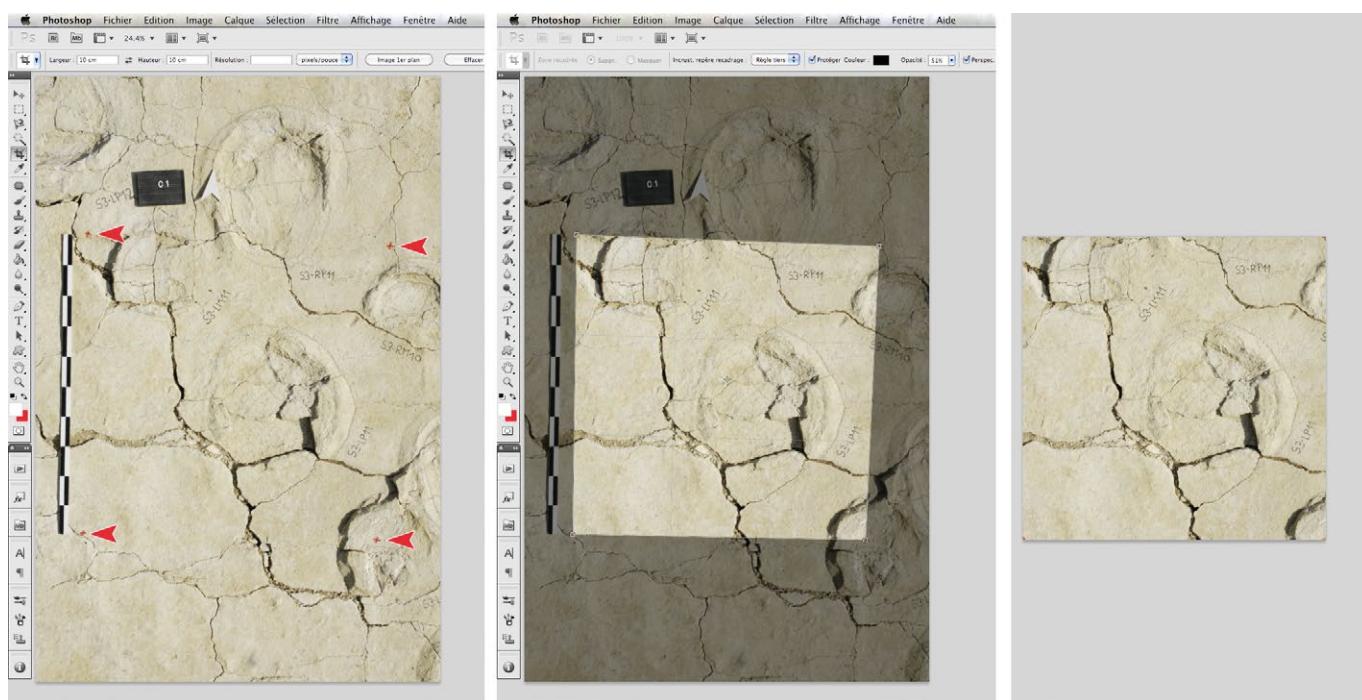
Assemblages de surfaces

Ils permettent d'avoir une vision d'ensemble d'un site, d'un secteur ou d'une piste sans la précision des orthophotos mais avec une mise en œuvre beaucoup plus simple et plus rapide. Ces assemblages peuvent être obtenus avec le module *photomerge* de Photoshop. Pour cela les images doivent avoir

des caractéristiques similaires (densité, contraste, température de couleur) et il est préférable d'utiliser des photos réalisées au même moment, dans des conditions identiques. Pour ce qui est des montages de photographies de surfaces, l'orientation par rapport au nord et l'échelle doivent être les mêmes pour chaque prise de vue. Toute éventuelle modification des images pour cet assemblage doit être enregistrée pour permettre à *photomerge* d'opérer. Les images successives doivent comprendre chacune une partie commune avec la précédente et avec la suivante pour permettre au logiciel de travailler (fig. 156).

Photomerge offre plusieurs possibilités pour réaliser ces assemblages. Selon le type d'images originales utilisé, une méthode sera plus appropriée qu'une autre et il est nécessaire de les essayer toutes pour obtenir le résultat le plus satisfaisant. Sur Photoshop CS5, une des options, la disposition interactive, ne se trouve plus d'office dans le module *photomerge*; il faut, pour la retrouver, télécharger le module externe *photomergeUI.plugin* sur le site d'Adobe et l'installer dans: *Applications/Adobe Photoshop CS5/Plug-ins/Automate*. Photoshop doit être redémarré après avoir coché la case *ouvrir en mode 32 bits* dans le panneau *infos* sur *Adobe Photoshop CS5*. *Disposition interactive* est alors disponible et permet «d'aider» le logiciel à trouver la position des images lorsqu'il ne parvient pas à le faire tout seul.

Une possibilité de «réglage» préalable des images composant un assemblage *photomerge* est la fonction réglages/correspondance de la couleur du menu *image*, en utilisant comme source la meilleure image de la série à assembler. Ces réglages, une fois enregistrés, permettront d'obtenir une densité et des couleurs homogènes dans l'assemblage *photomerge*. Les images ainsi assemblées sont déformées par le logiciel afin de pouvoir se juxtaposer et une échelle ne constitue donc qu'une indication.



Assemblages panoramiques

Une photo panoramique est un assemblage d'une succession de prises de vues en faisant tourner l'appareil de façon à ce que les images se recoupent. Cette technique a pour but, soit d'obtenir une image recouvrant un angle plus important que celui qu'embrasse l'objectif de l'appareil, soit une

image qui sera bien plus grande qu'une prise de vue unique, ou encore les deux. Pour mieux repérer un groupe de photos panoramiques parmi d'autres, il est préférable d'effectuer cette série de prises de vues en tournant de gauche à droite (fig. 157 et 158). Les assemblages sont ensuite réalisés à l'aide de photomerge.

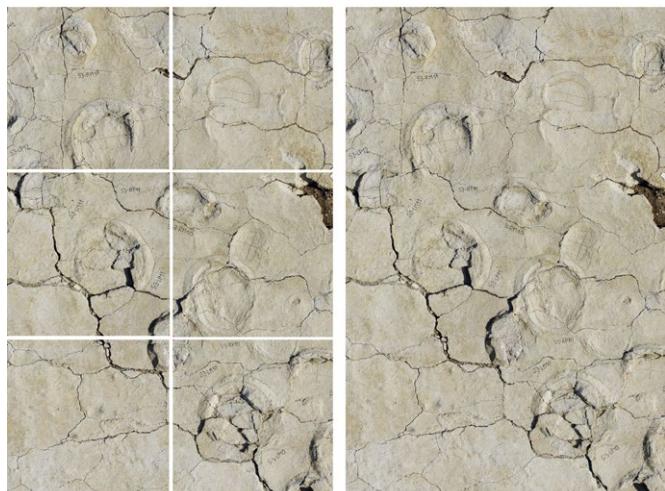


Fig. 155. Assemblage d'une portion de piste : images intermédiaires et finale.

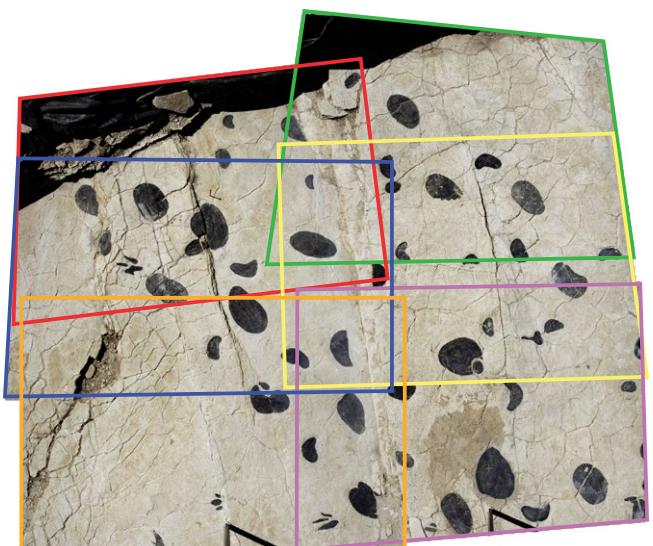


Fig. 156. Chevauchement de six images destinées à être assemblées.

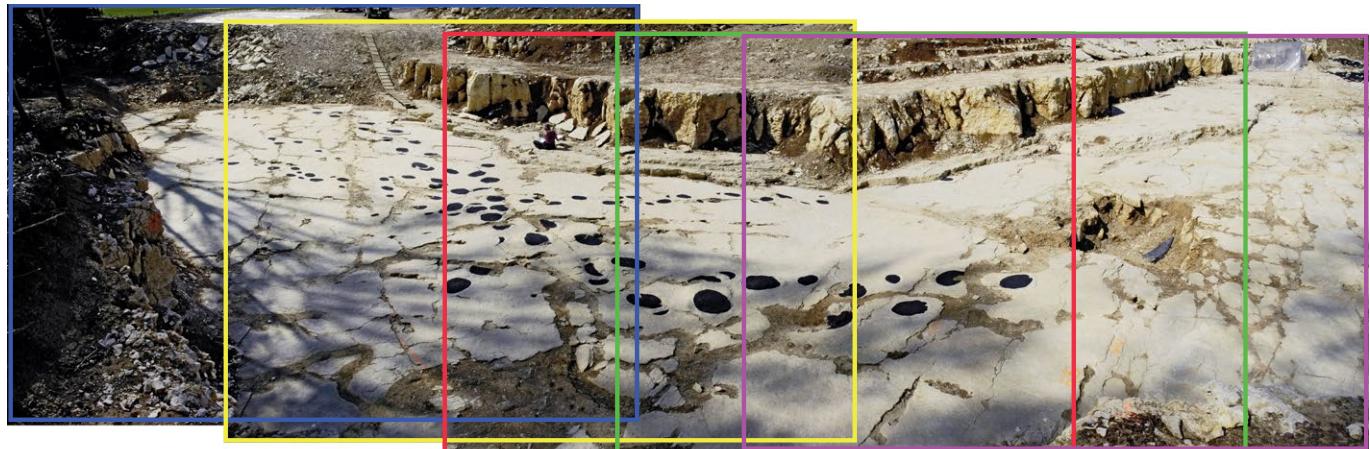


Fig. 157. Exemple de prises de vues successives.



Fig. 158. Assemblage panoramique.

6.4.3 Photos stéréo – anaglyphes

Prises de vues

Les photos stéréoscopiques faites de deux prises de vues d'un même objet permettent la restitution d'une image en trois dimensions. Lorsqu'elles sont imprimées, elles peuvent être regardées à l'aide de lunettes prismatiques si elles sont côte-à-côte (vision parallèle) ou de lunettes rouge et cyan si elles sont superposées (anaglyphe).

Pour une seule image stéréo, deux prises de vues sont nécessaires, la deuxième étant décalée de 6 à 7 cm, à l'horizontale, par rapport à la première (fig. 159). À main levée, la première photo est prise, pieds joints, en repérant bien dans le cadrage le centre de l'image puis, après avoir écarté un pied de l'autre d'une trentaine de centimètres, la seconde est réalisée en la centrant sur le même point du sujet photographié. Il est préférable de saisir systématiquement le couple gauche-droite dans le même ordre afin de tout de suite repérer ensuite l'emplacement de chacune des images.

Mise en forme du couple d'images

Ouvrir les deux images dans Photoshop et dupliquer l'image de droite sur celle de gauche (fig. 160), puis fermer la première en conservant le fichier contenant deux calques.

Dans le fichier obtenu, à l'aide de la palette *calques*, abaisser l'opacité du calque supérieur jusqu'à un pourcentage dépassant légèrement 50 % (fig. 161).

Le but des opérations suivantes est d'éviter au maximum un décalage des deux images sur l'axe vertical et de les centrer sur l'axe horizontal.

À l'aide de l'outil *déplacement*, ajuster le calque supérieur de façon à ce que les deux images se superposent au mieux.

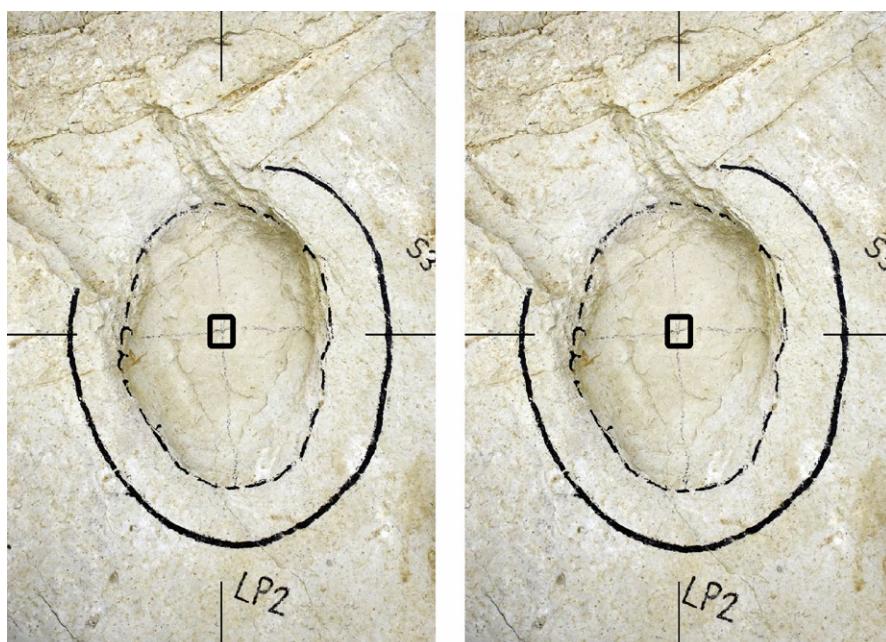


Fig. 159. Couple stéréo gauche-droite.

L'opacité du calque est ensuite rétablie et le calque inférieur est masqué, ce qui permet, à l'aide de la fonction *rognage* du menu *image* avec l'option *pixels transparents* cochée, de recadrer l'image correctement. Le calque inférieur peut être de nouveau rendu visible.

Il peut être nécessaire, pour faire coïncider les deux images, d'appliquer une rotation à l'image supérieure. À cette fin, utiliser la fonction *transformation manuelle* puis rétablir l'opacité : le recadrage ne peut alors se faire qu'avec l'outil *recadrage*.

Il est possible d'effectuer le déplacement et la rotation, si les deux sont nécessaires, directement avec la *transformation manuelle* en prenant garde de ne pas déformer l'image. Le recadrage est aussi fait dans ce cas à l'aide de l'outil *recadrage*.

Si les deux calques n'ont pas tout à fait la même densité ou la même couleur, à l'aide du menu *image/réglages/correspondance de la couleur*, régler celui qui semble le moins bon sur le meilleur en modifiant la cible dans *source* et *calque*.

L'opération suivante consiste à appliquer à chacune des images respectivement un calque rouge et un calque cyan. La solution la plus simple est de se rendre dans le panneau *calques* et créer un calque de couleur unie (fig. 162). Le sélecteur de couleur s'ouvre alors.

Pour obtenir le filtre rouge, il faut introduire les données suivantes R:255 pour V:0 et B:0. Pour comprendre, il faut se munir des lunettes de lecture des anaglyphes en regardant du côté de l'œil rouge dans le sélecteur de couleur; le petit carré rouge doit apparaître comme le plus clair possible et, au travers du côté droit, le plus sombre possible. Pour le filtre cyan, les chiffres à introduire sont V:0, R:255 et B:255; avec les lunettes cela correspond à la même opération que pour le rouge mais, pour l'œil droit, le petit carré vert doit être le plus clair possible et inversement pour l'œil gauche (fig. 164).

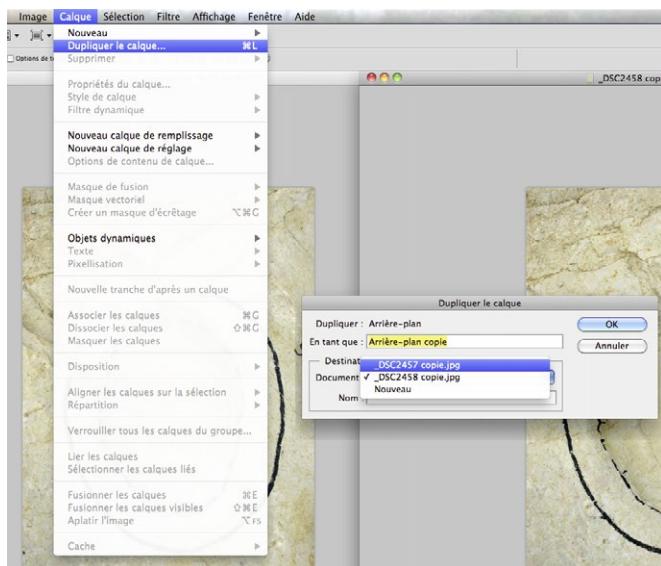


Fig. 160. Duplication du calque.



Fig. 161. Baisse de l'opacité du calque supérieur et ajustement.

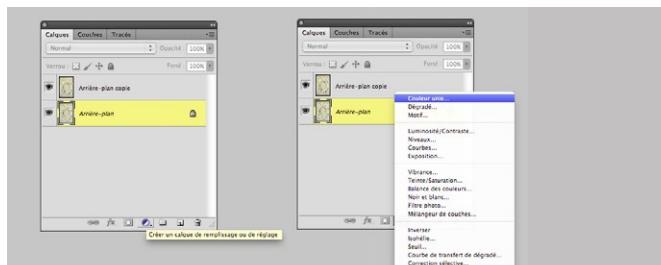


Fig. 162. Création de calques de remplissage de couleur unie.

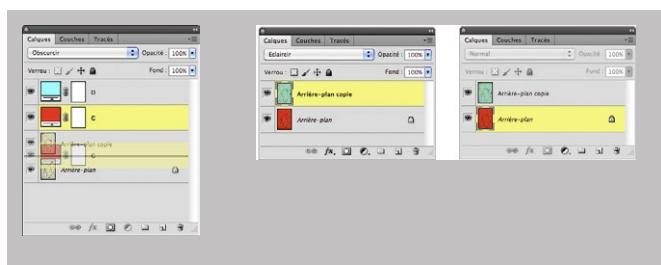


Fig. 163. Ordre et mode de fusion des calques.

Le mode de fusion de chacun des calques rouge et cyan est réglé sur *obscurcir* dans le panneau *calques*. Le calque cyan est placé sur l'image destinée à l'œil gauche et le rouge sur l'image de l'œil droit (fig. 163).

Les filtres sont ensuite fusionnés avec leur image inférieure respective. Dans le panneau des calques, le mode de fusion du calque supérieur ainsi obtenu est réglé sur *éclaircir* alors que celui du calque inférieur reste *normal* (fig. 163).

L'anaglyphe est réalisé et l'image peut être aplatie (fig. 165).

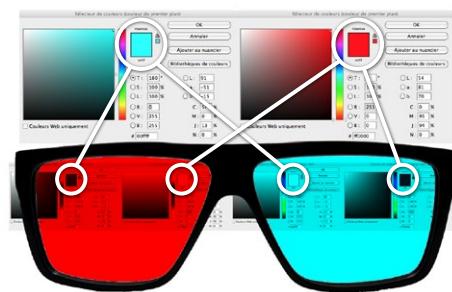


Fig. 164. Crédit de filtres.

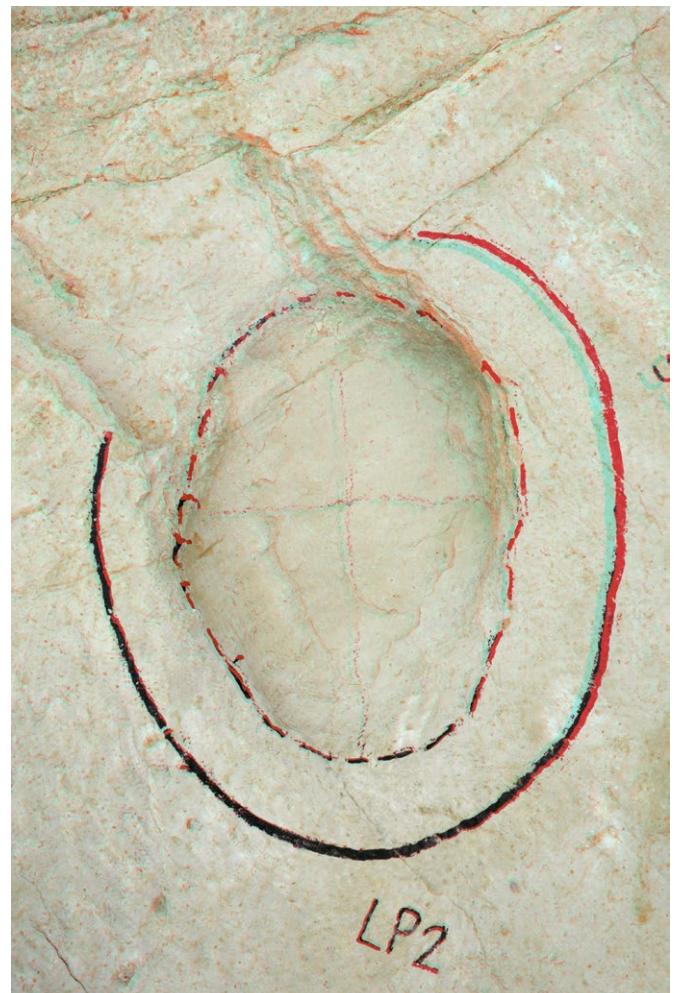


Fig. 165. Image finale.

6.5 Mandats externes

6.5.1 Orthophotographie

En 2002, les tout premiers balayages laser ont été réalisés par Terradata AG sur le site à traces de dinosaures de Courtedoux-Sur Combe Ronde (Hanusch et Vogel 2014; chap. 6.5.2; Marty et al. 2003; Staudacher et al. 2003). Par la suite, le site de Chevenez-Combe Ronde a également été scanné. Ce travail a été réalisé conjointement à une orthophotographie de basse résolution. Cette expérience a montré que beaucoup d'informations supplémentaires pouvaient en découler (texture de la surface, informations géométriques).

Ainsi, en décembre 2006, un balayage laser et des orthophotos (carreaux de 4x4 m) ont été réalisées par l'entreprise Flotron AG (anciennement Perrinjaquet) sur la dalle principale 1000 du site de Courtedoux-Tchâfouè. Ce travail a nécessité l'utilisation d'une grue télescopique, les clichés étant effectués d'une hauteur d'environ 11 m avec un appareil et un objectif spécifiques (Canon EOS 5D et 5D Mark II; Leica 35mm).

Par la suite, ce type d'intervention a été appliqué sur les sites de Courtedoux-Bois de Sylleux et Courtedoux-Béchat Bovais, la taille des zones variant entre 700 et 4500 m² environ. Tous les sites ont été photographiés à l'aide d'un engin de type Manitou

équipé d'un panier de 4 m de large (fig. 166), excepté le site de Courtedoux-Béchat Bovais (couche 515) qui a nécessité un camion-grue. Pour les niveaux les plus étendus (>500 m²), l'enregistrement s'est fait à une résolution de 2 mm (résolution au sol). Il a aussi été décidé d'effectuer une couverture stéréoscopique basée sur les coordonnées nationales. Les petites zones individuelles (squelettes de crocodiles, traces de sauropodes juvéniles) ont été documentées avec une résolution de 1 mm voire moins. Ceci est un bon compromis compte tenu de la perception du détail dans l'image et des coûts.

Il était important de prêter garde, lors de la réalisation des photos, que des objets perturbateurs – ombre de la grue, élastiques de carroyages, personnages, etc. – n'interfèrent pas (fig. 167). Les ombres en particulier compliquent le traitement ultérieur des données de manière significative : les enregistrements ont donc été effectués, dans la mesure du possible, à la fin de l'automne et durant l'hiver, par temps couvert (brouillard).

En ce qui concerne le traitement des données d'images, pour obtenir une mosaïque d'orthophotos, le logiciel Adobe Photoshop a été utilisé pour la conversion de format de données brutes CR2 en tiff (Tagged Image File Format); l'élimination de l'effet de vignettage (diminution de la luminosité de l'image du centre de l'image vers le bord de l'image); le traitement de l'aberration chromatique (franges de couleur dans les coins);



Fig 166. Réalisation d'orthophotos à l'aide d'un engin de type Manitou.

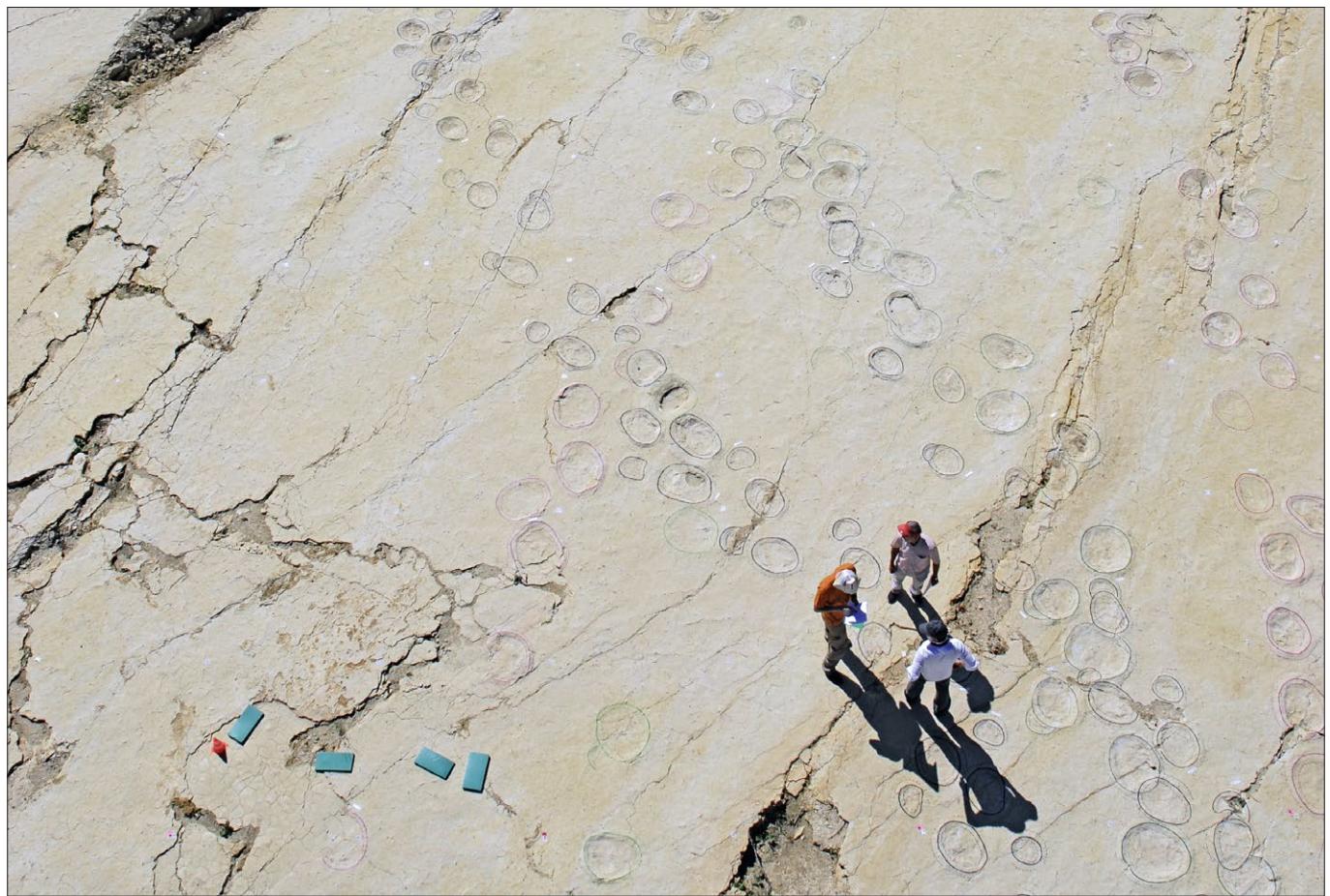


Fig. 167. Préparation de la surface pour la réalisation d'orthophotos.

et les différences de luminosité entre les images. Le logiciel KLT a servi à restaurer l'orientation, au calcul des orthophotos, aux mosaïques d'orthophotos ainsi qu'à la production stéréo 3D de l'objet.

Contrairement au balayage laser, l'orthophotographie permet de documenter des informations importantes des surfaces comme la texture de la surface, le contour peint des empreintes et le numéro des traces ou des pistes (fig. 168a). Dans le cas de la documentation de la dalle principale 500 de Courtedoux-Béchat Bovais, contrainte par la construction de l'autoroute, l'orthophotographie a représenté un gain de temps considérable et a permis de réaliser le plan des pistes, numérisé par la suite, à partir des orthophotos.

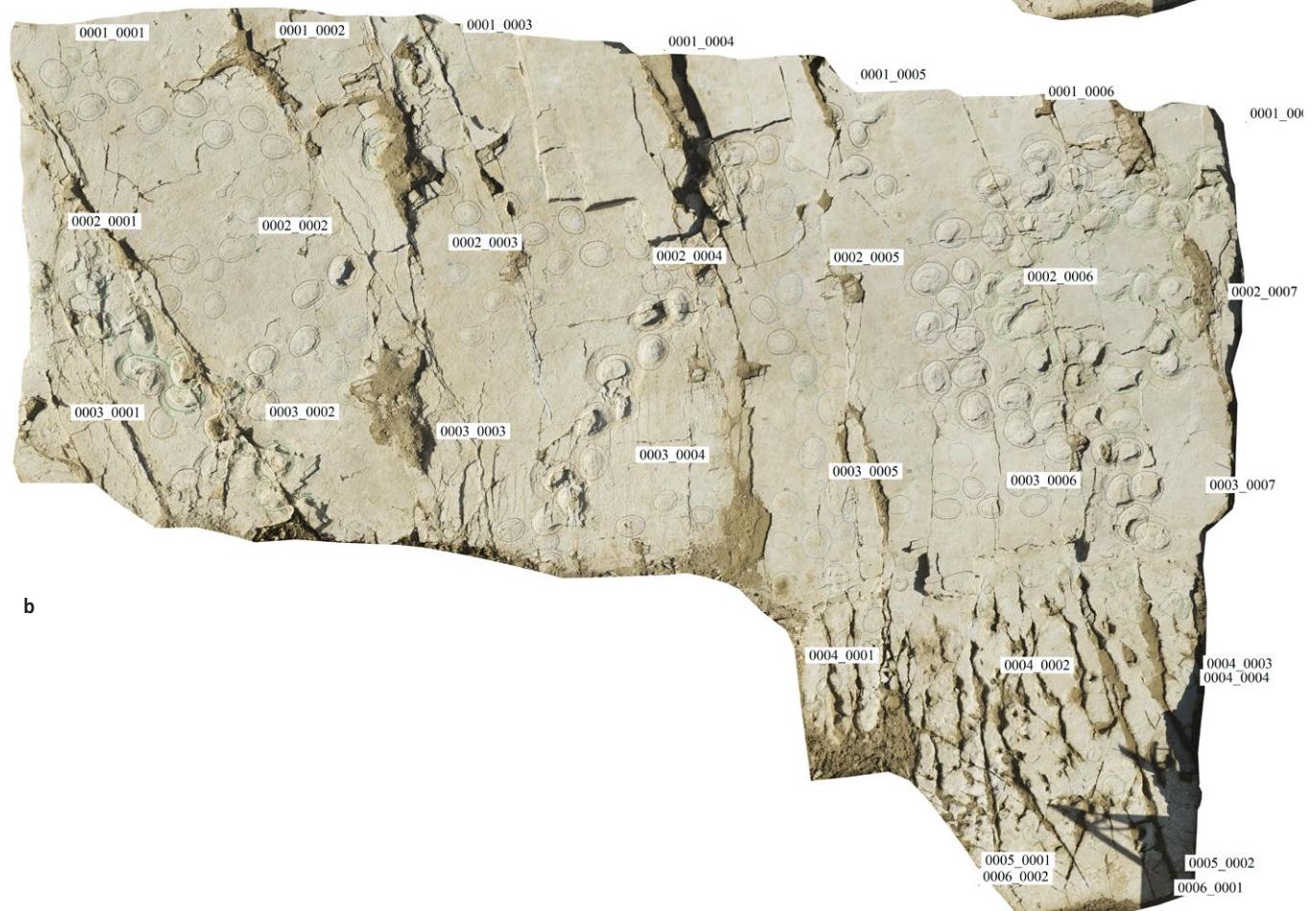
Un modèle numérique d'élévation basé sur le balayage laser (chap. 6.5.2), créé par la société Terradata AG, est impératif pour le calcul des orthophotos (projection parallèle). Le modèle d'élévation ainsi que l'orientation des données d'image ont été réalisés dans le même système – condition indispensable – de coordonnées nationales. L'avantage, contrairement à une photo classique, réside dans le fait que l'échelle de toute l'orthophoto est constante et que chaque point y est fidèle, sans présenter de déformation. Ainsi, l'orthophotographie peut être utilisée comme outil de contrôle et de comparaison des plans synoptiques de surfaces réalisés sur le terrain.

Il convient toutefois de noter que la direction de projection des orthophotos est parallèle à la verticale (hauteur/axe z) du système de coordonnées utilisé, et non pas parallèle à la normale de la surface. Dans certains cas, les dalles à traces étant subhorizontales mais présentant tout de même une légère inclinaison (Courtedoux-Bois de Sylleux et Courtedoux-Béchat Bovais, p. ex.), une faible distorsion de l'objet produit pourra découler de l'adaptation de l'inclinaison de l'objet au système de coordonnées nationales.

La livraison des données comprend donc les données d'image, des aperçus des images, les données de l'appareil photo, les données d'orientation, les orthophotos et la mosaïque d'orthophotos dans plusieurs résolutions différentes.

Les mosaïques d'orthophotos de grandes surfaces, réalisées avec une résolution de 2 mm, ont été initialement livrées sous forme d'une série de carreaux de 10 m sur 10 m, le fichier total étant de trop grande taille pour permettre une ouverture aisée (fig. 168b,c). Par la suite, à la demande de la Paléontologie A16, chaque objet enregistré a été livré dans la plus haute résolution existante, sous forme de fichiers individuels.

Les fichiers ont été livrés en format tiff selon la révision des normes tiff 6.0 du 3 juin 1992. Les données d'image ont été enregistrées sans compression jpg afin d'éviter toute perte de qualité.



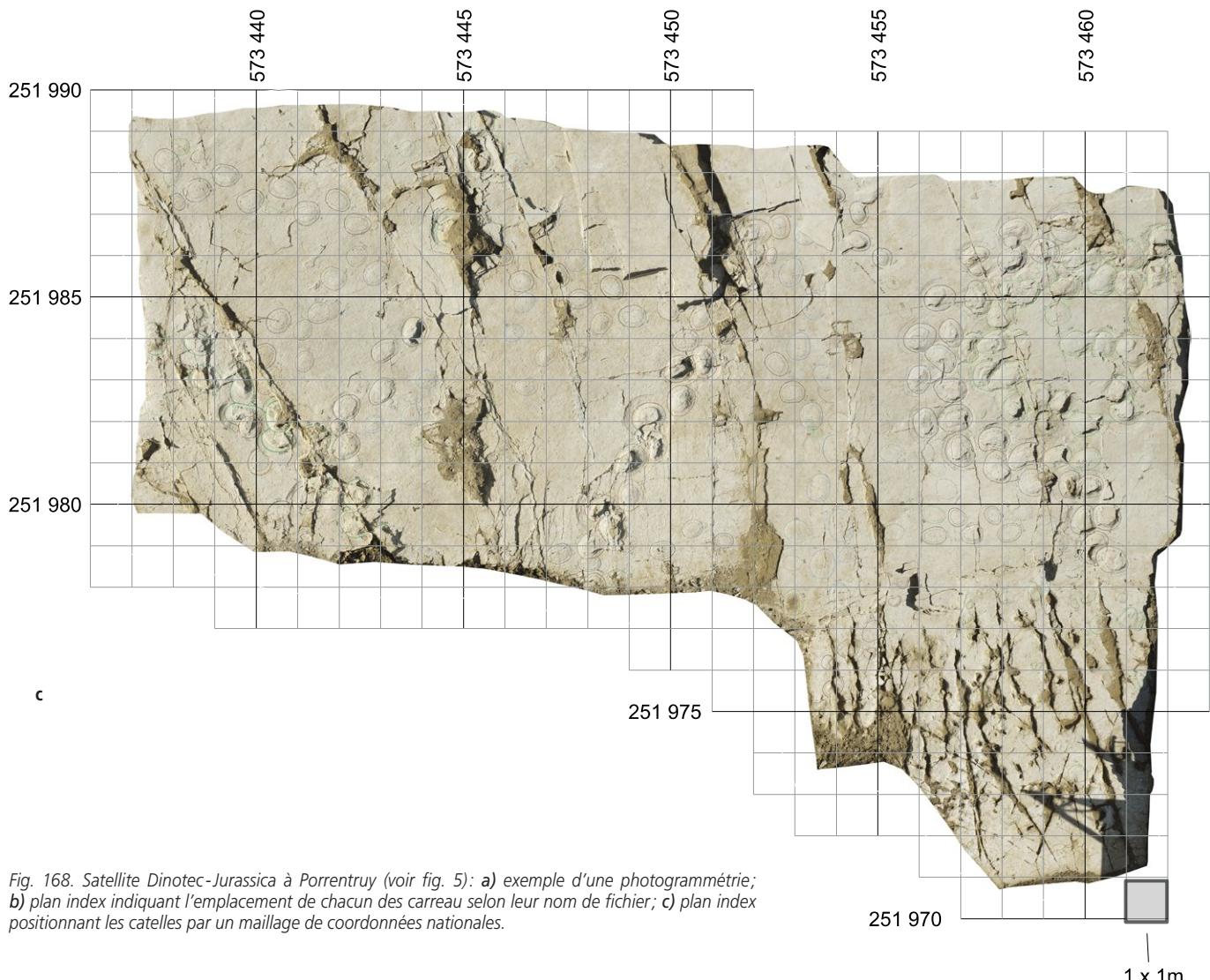


Fig. 168. Satellite Dinotec-Jurassica à Porrentruy (voir fig. 5): a) exemple d'une photogrammétrie; b) plan index indiquant l'emplacement de chacun des carreau selon leur nom de fichier; c) plan index positionnant les catelles par un maillage de coordonnées nationales.

Les mosaïques d'orthophotos ont été divisées en carreaux selon leur taille. Les carreaux sont joints sans superposition, géoréférencés et positionnés au moyen des fichiers de métadonnées (*.tfw). De cette manière, les images peuvent être chargées et affichées sous forme de mosaïque complète dans tous les programmes traitant des données géoréférencées (GlobalMapper, ArcGIS, Quantum GIS, p. ex.).

La destruction ou le recouvrement des empreintes de dinosaures par l'autoroute A16 a motivé la décision de réaliser ces orthophotos car elles constituent une documentation très efficace et représentative de ces biens culturels. Conjointement aux orthophotos, et à titre d'essai, des segments de piste d'importance particulière du site de Courtedoux-Bois de Sylleux (couche 1040) ont été sélectionnés pour évaluer leur potentiel de visualisation sous forme de fichiers 3D pdf. Ce format permet de visualiser des objets 3D, y compris les informations de couleur (texture) par superposition du modèle d'élévation et de la mosaïque d'orthophotos dans toutes les positions (fig. 169). Un «manuel d'instructions» existe pour la visualisation de tels fichiers dans Acrobat Reader.

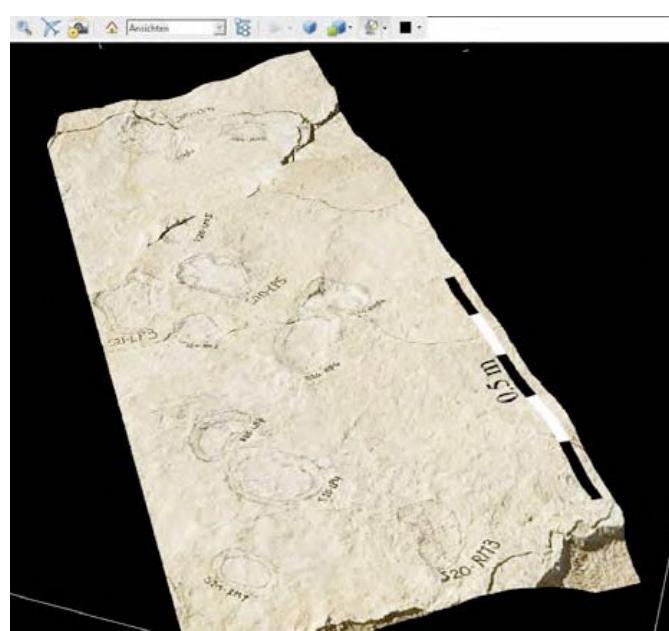


Fig. 169. Extrait d'un fichier 3D réalisé par superposition du modèle d'élévation et de l'orthophoto.

6.5.2 Balayage laser

Avec la découverte des premières traces de dinosaures sur le site de Courtedoux-Sur Combe Ronde, la question de savoir quel type de documentation réaliser sur des surfaces aussi vastes, vouées à disparaître et difficiles à extraire, s'est rapidement posée.

Outre une documentation ichnologique classique, le professeur Christian Meyer, à l'époque conseiller scientifique de la Paléontologie A16, avait suggéré des mesures complémentaires par balayage laser. Dans le cadre des relevés du site à traces de Moutier, il était déjà en contact avec la société Terradata AG (Einsiedeln) qui, dès lors, a été mandatée par la Paléontologie A16 pour le scannage 3D des surfaces (Pulfer 2012).

Le premier balayage laser a donc été réalisé par Terradata AG à l'aide d'un laser Cyrax 2500 sur le site à traces de dinosaures de Courtedoux-Sur Combe Ronde (chap. 6.5.1 ; Marty et al. 2003 ; Staudacher et al. 2003). Les premiers résultats se sont révélés très intéressants, mais de finalement faible résolution par rapport aux relevés ultérieurs effectués avec le Cyrax HDS 3000 (dès 2006) et surtout le Riegl VZ-400 (à partir de 2009). Par conséquent, cette méthode de documentation a été appliquée par la suite sur toutes les surfaces à traces majeures. Grâce à l'évolution des nouveaux appareils, la résolution des modèles a donc pu être améliorée en permanence, de sorte qu'elle était, au final, de l'ordre de quelques millimètres seulement.

Sur le terrain, il était important de garantir une couverture complète des dalles à traces et d'atteindre une qualité satisfaisante

avec les nuages de points. Selon la grandeur de la surface, jusqu'à 30 repositionnements du scanner étaient nécessaires puisque la résolution des points diminue avec l'augmentation de la distance au scanner. Le but étant d'éviter les zones mal répertoriées en produisant un maximum de chevauchements. Terradata AG mesurait systématiquement les points fixes de référence des sites avec un tachymètre d'une précision de quelques millimètres. La Paléontologie A16 devait s'assurer que les surfaces soient les plus propres et les plus sèches possible afin de garantir une qualité idéale de prise de données (fig. 170).

Les nuages de points ont ensuite été découpés selon le périmètre souhaité (par Terradata AG) et le bruit des points a été nettoyé à l'aide d'un logiciel. Les coordonnées locales ont été transposées en coordonnées nationales. La surface à traces a ensuite été exportée. Ce modèle de surface 3D constitue également la base pour le calcul des orthophotos (chap. 6.5.1).

Concernant la transmission des données du carrelage final, les fichiers totaux – trop volumineux – ont été exportés en version plus petite, et transmis par bandes d'environ 5m de large. Selon la résolution, des carreaux d'un demi-mètre ou d'un mètre étaient numérisés pour les points et le maillage dans les formats d'échange .dwf et .dwg (lisibles en CAD commercial). La division en carreaux constitue un travail très contraignant et les scans de grandes surfaces peuvent engendrer jusqu'à 20 000 fichiers par couche (couches 500 et 515 de Courtedoux-Béchat Bovais, p. ex.)

En plus des carreaux livrés dans le format .dwg et .dwf, un fichier en format ASCII (American Standard Code for Information



Fig. 170. Réalisation d'un balayage laser sur la couche 1000 du site de Courtedoux-Bois de Sylleux.

Interchange) contenant tous les points saisis a aussi été transmis systématiquement à la Paléontologie A16. Ce fichier ASCII contient les coordonnées xyz et les valeurs RVB de tous les points et est indépendant d'un logiciel. De cette façon, un archivage et la possibilité de traitement de ces données primaires importantes à long terme sont garantis.

Quant au poids des fichiers en format ASCII (xyz et RVB), il faut s'attendre à des moyennes de 2 MB/m². Pour ce qui est de la fusion des orthophotos et des carreaux (nuages de points et maillage .dxf et .dwg), à une moyenne de 13 MB/m² environ. Le balayage laser de la plus grande surface (couche 500) de Courtedoux-

Béchat Bovais a généré le volume total de données suivant: 28 GB (RiScan), 870 MB (données POD, Pointools) et 4 GB (xyz fichiers, ASCII).

Ces activités de balayages laser réalisés sur les sites à traces de dinosaure ont représenté une tâche exigeante et passionnante pour la société Terradata AG. Ces objets détruits ou recouverts par la construction de l'autoroute nécessitaient une documentation moderne par l'application des technologies de mesure 3D (fig. 171). Avec l'évolution et les perfectionnements des techniques au cours du temps, les frais financiers liés ont constamment diminué alors que la résolution allait en s'améliorant (fig. 172).

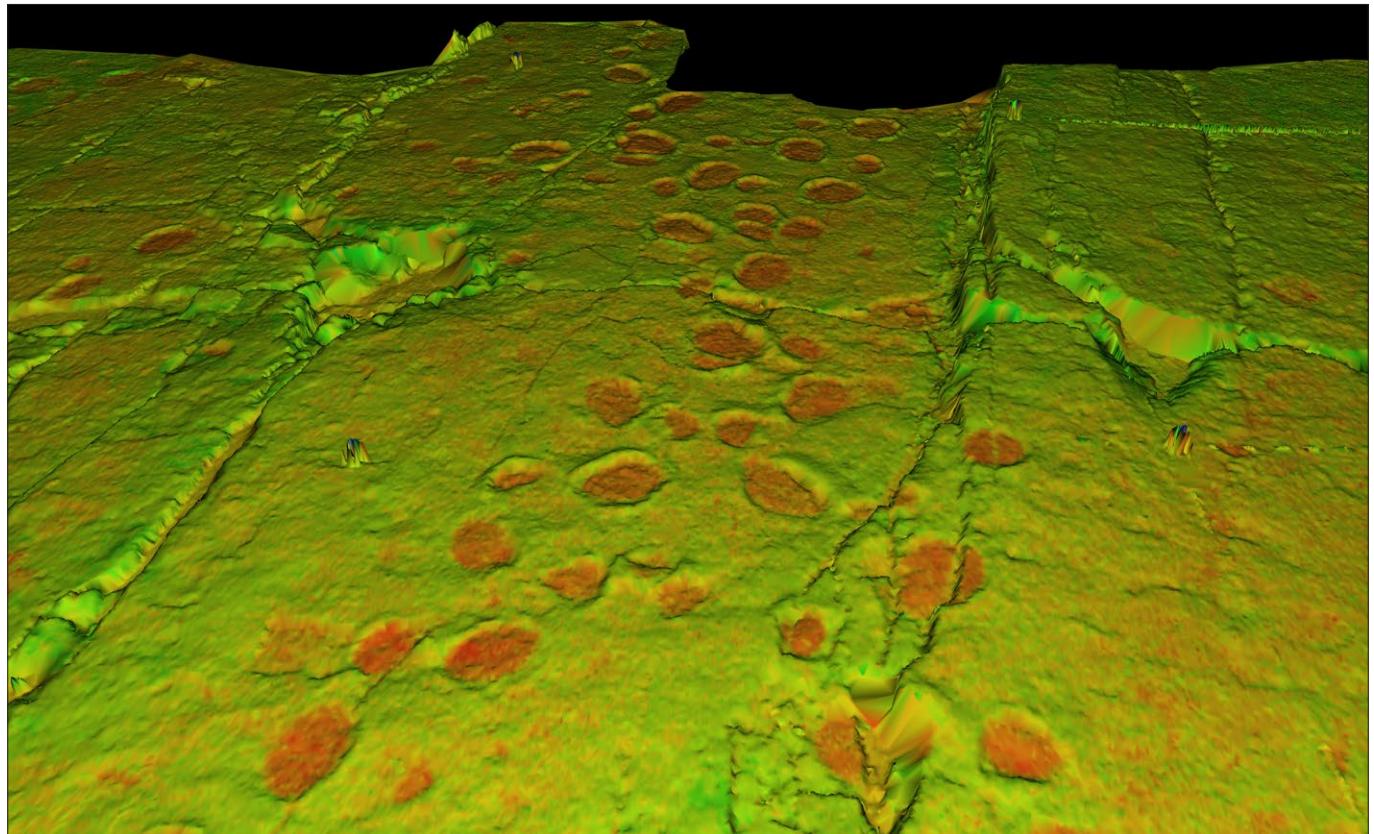
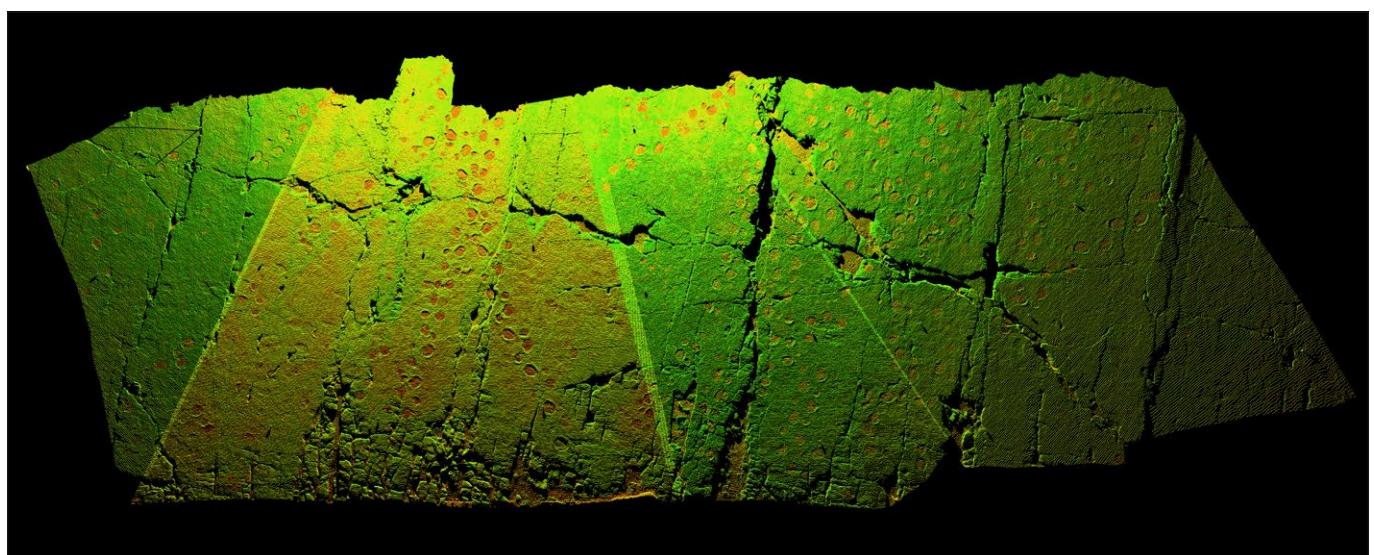


Fig. 171. Balayage laser général et détaillé (Courtedoux-Sur Combe Ronde, couche 1000).

6.5.3 Balayage laser haute définition

En 2011, la société Pöyry Infra AG a été mandatée par la Paléontologie A16 pour réaliser des balayages laser à haute résolution dans le domaine du submillimétrique ($\pm 0,1\text{ mm}$) de certaines traces de dinosaures sélectionnées pour leur importance significative (conservation exceptionnelle, p. ex.) (Fretz 2011).

Après quelques tests effectués dans la collection, sur certains prélèvements de traces et aboutissant à de très bons résultats, une campagne de mesures menée par René Fetz a été mise en œuvre en mai 2011 sur les sites de Courtedoux-Béchat Bovais (couche 500) et de Courtedoux-Sur Combe Ronde (couche 1500). Un scan laser FARO a été utilisé et installé sur un bras Platinum de 3 m. C'est uniquement grâce à ce bras de scan mobile et massif qu'une telle précision et une résolution aussi élevée peuvent être atteints (fig. 172).

Les données ont été transmises en .obj (Wavefront), format de fichier ouvert permettant de stocker des formes géométriques en trois dimensions, soutenu par de nombreux programmes graphiques 3D et donc bien approprié pour le partage multiplateforme de modèles 3D. Un rapport a en outre été rédigé : y figurent tous les modèles 3D sous forme d'images .jpg, ainsi qu'une photo des traces correspondantes sur le terrain (fig. 173). Les coordonnées des trois points de mesure (calibrés par Terra-data AG) sont aussi fournies pour chaque modèle.



Fig. 172. Balayage laser haute définition réalisé à Courtedoux-Béchat Bovais.

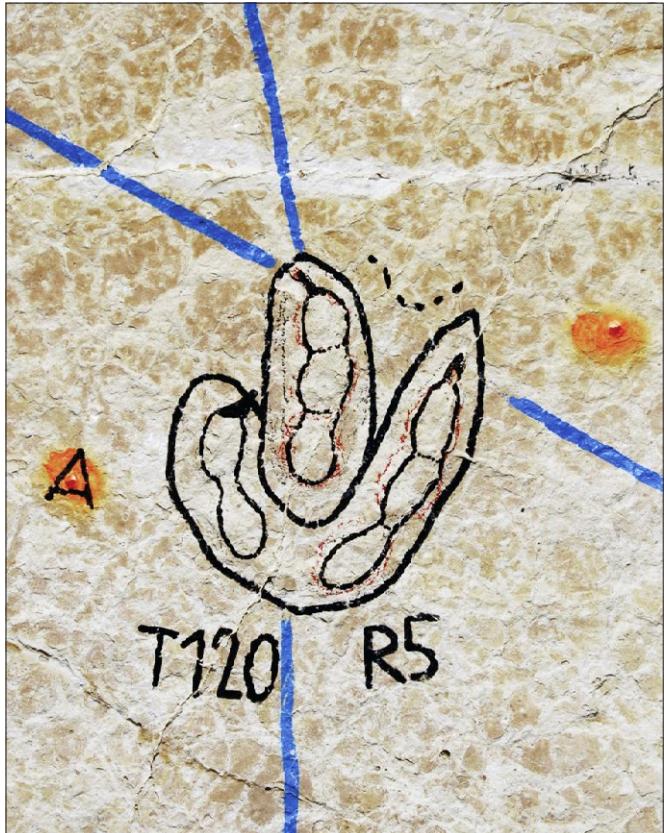
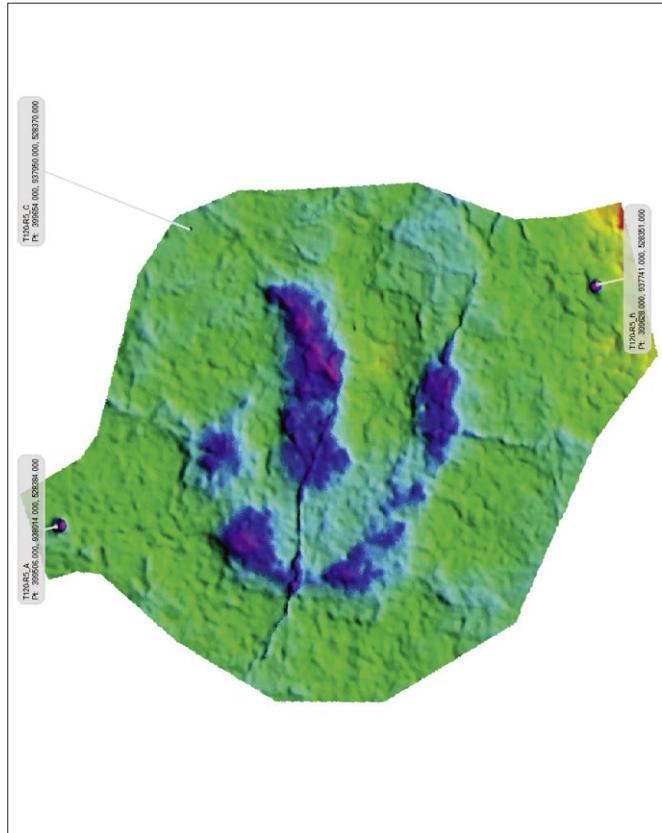


Fig. 173. Exemple d'un modèle 3D (à gauche) avec la photo de l'empreinte correspondante (à droite).

6.5.4 Modèles photogrammétriques 3D

En 2013, Matteo Belvedere (Musée d'histoire naturelle de Berlin) a été mandaté pour la réalisation de modèles photogrammétriques 3D de traces de dinosaures, sélectionnées pour leur importance particulière (très bonne préservation) (Belvedere 2013, 2014).

De tels modèles sont produits à partir d'une série de photographies bidimensionnelles prises depuis des points de vue différents, avec un logiciel spécial (Agisoft Photoscan Pro dans ce cas). Un nuage de points est tout d'abord produit, puis un modèle de maillage. Ce dernier est ensuite exporté et, grâce à un logiciel spécifique (Meshlab et Polyworks), un modèle d'élévation (*contour-lines model*) et un modèle de profondeur en fausses couleurs (*false-colour depth map*) sont obtenus.

Ont été réalisés pour chacune des empreintes traitées :

- un maillage photogrammétrique 3D (*3D photogrammetric mesh*) dans un format ply (Stanford Polygone Library) et une capture d'écran en format .jpg pour la visualisation ;

- un ou deux modèles de profondeur en fausses couleurs (*false-colour depth map*) en formats .tif et .jpg ;
- deux modèles d'élévation (lignes de contour carte) avec une gradation de 1 mm et 0,5 mm dans un format Illustrator (fig. 174).

La précision de la résolution pour tous les modèles est de moins d'un millimètre.

Éléments modélisés				
	Secteur	Couche		
BSY008-336	20	1040	T1 L3	tridactyle
BSY008-337	20	1040	T1 R2	tridactyle
TCH006-403	12	1065	E180	tridactyle
TCH006-64	12	1065	E28	tridactyle
BSY008-342bis		1040	S23 LP3	pied de bébé sauropode
BSY008-342bis		1040	S24 RM2	main de bébé sauropode
BEB-500-321			S1 LP8 S1 LM8	pied et main de sauropode
TCH006	Sct12	1065/404	E183	tridactyle
TCH006	Sct12	1065/404	E185	tridactyle

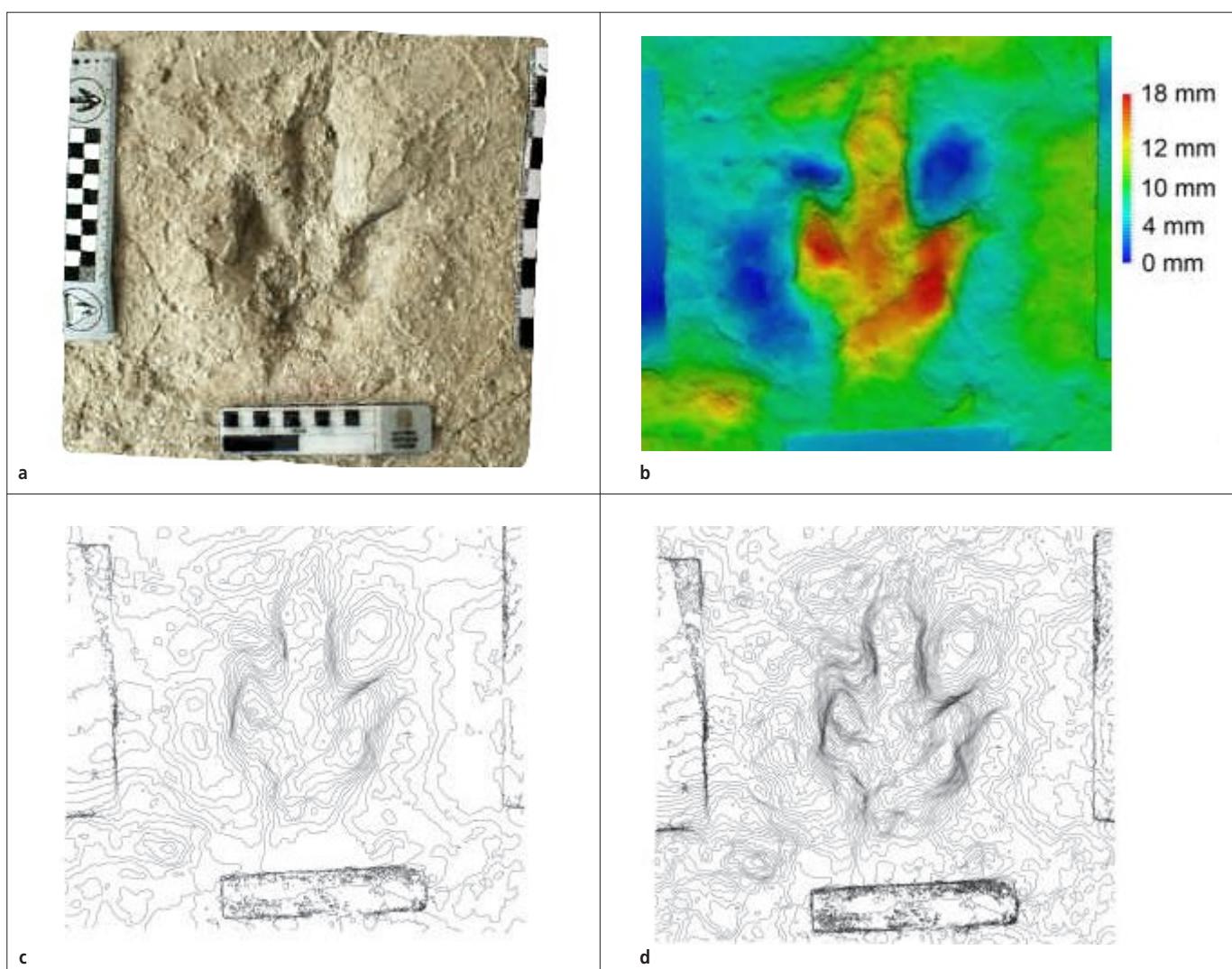


Fig. 174. Travail réalisé sur le prélevement TCH006-403 de l'empreinte E108: a) photogrammétrie du prélevement; b) modèle de profondeur en dégradé colorimétrique; c) et d) modèles d'élévation, les gradations de 1 mm et 0,5 mm sont indiquées par les courbes de niveau.

Annexe 1

Système d'information documentaire

Principes d'ordonnancement des prélèvements et données informationnelles correspondantes

1 Nomenclatures et dénominations

Afin de pouvoir cerner l'ensemble des données physiques et informatiques relatives à la partie « ichnologie des dinosaures » et dépendant des principes d'information documentaire appliqués à la Paléontologie A16 entre 2006 et 2014 par l'équipe du système d'information documentaire (SID), il est utile d'évoquer en préambule certaines nomenclatures et dénominations propres à la PAL A16, sans quoi la compréhension des informations apparaissant tant dans les données électroniques que sur les étiquettes devient difficile.

Nous n'évoquons pas ici les procédures et les référentiels, bien que la micropaléontologie et la systématique du vivant soient spécialement concernées. Dans le domaine des microfossiles, la définition de la procédure est complexe, et nous nous éloignerions trop du sujet à l'évoquer ici; quant à la systématique, c'est plutôt le contraire car, pour l'essentiel, nous sommes en présence de *Sauropoda*, *Theropoda*, aucun ichnotaxon n'étant couramment utilisé à la PAL A16 à fin 2014.

Le SGBDR¹ iPal n'étant pas terminé à fin 2014, nous nous référions ici aux descripteurs selon l'architecture des fichiers de chantier (Excel); toutefois, les mêmes descripteurs ont été conservés dans le modèle d'entités et d'attributs d'iPal, mais ils ne se trouvent pas forcément au même endroit. Au-delà des technologies, les concepts restent donc les mêmes, ce qui ne nuit pas à la démarche intellectuelle.

1.1 Code d'inventaire

Les prélèvements et relevés de terrain, détaillés plus loin, sont des objets documentaires remplis d'informations et identifiés par un code d'inventaire qui peut être décomposé en trois termes: l'acronyme du site (p. ex. SCR), l'année d'excavation (009) – ces deux paramètres représentent ce que nous dénommons « chantier » (SCR009) –, enfin un numéro, ajouté par incrément, au gré du jour des trouvailles sur les chantiers². Dès lors, nous obtenons un identifiant unique (SCR009-1). Concernant les relevés, le même principe est appliqué, avec toutefois l'adjonction de la lettre r devant le numéro (SCR009-r1). Ainsi, SCR009-1 est un moule interne d'*Ammonoidea* tandis que SCR009-r1 est un dessin de terrain de *Chelonia*.

1.2 Codage des types de prélèvement

La nomenclature des prélèvements a été définie. Le type est l'un des dix-huit descripteurs associé à un prélèvement. Les plus importants concernant la partie ichnologie, quantitativement parlant, sont le fossile (f) et le sédiment (s). Le matériel archéologique (a) ne concerne que la période Cénozoïque, en

Type	Prélèvements
a	matériel archéologique
f	fossile
fl	lot de fossiles
mf	microfossile
mfl	lot de microfossiles
m	minéral
ml	lot de minéraux
mm	microminéral
mml	lot de microminéraux
s	sédiment

raison d'artefacts trouvés dans les dolines. Un lot de fossiles (fl) est constitué de plusieurs fossiles, en principe de même espèce, retrouvés au même endroit, desquels le responsable de chantier a souhaité qu'ils soient conservés ensemble. Ce type peut également faire référence à plusieurs fossiles différents présents sur un même prélèvement, comme par exemple un bloc calcaire avec plusieurs espèces de bivalves et de gastéropodes. L'appellation « microfossile » (m et dérivés mf, mfl, mm, mml) est réservée à la procédure de tamisage et picking; ils proviennent donc toujours des pickings issus du laboratoire technique de micropaléontologie (au Voirnet à Delémont).

1.3 Codage des types de destination (analyses physico-chimiques)

Un échantillon de collection (sc) désigne un prélèvement préparé, conditionné, marqué et coté, c'est-à-dire « mis en collection ». Dans la pratique, un échantillon de collection est rangé dans une armoire (E1) ou une étagère (E3, E15) de collection, tandis qu'un échantillon pour analyse se réfère à des analyses physico-chimiques non définies (sa) ou spécifiques (t, c, etc.).

Destinations		
sc	sample collection	collection d'échantillons
sa	sample analysis	échantillon pour analyses diverses
pr	preparation	préparation
t	thin section	lames minces
h	heavy minerals	minéraux lourds
p	palynology	palynologie
n	nannofossiles	nannofossiles
c	clay minerals	minéraux argileux
w	washing	lavage
bs	bulk sampling	échantillonnage total
g	geochemistry	géochimie
si	stables isotopes	isotopes stables
osl	optically stimulated luminescence	luminescence optiquement stimulée

1.4 Nomenclature des entrepôts et unités de stockage (2015-2018)

Les entrepôts et unités de stockage ont été définis autant de manière structurelle (lettre E pour entrepôt, suivi d'un numéro) que conjoncturelle, en fonction des contraintes, des besoins, de l'évolution des stocks, de la nature des objets stockés, des locaux à disposition, etc. Il a fallu structurer au sein d'un mouvement quasi perpétuel (chantiers, attributions des locaux et des étagères, circulation des prélèvements selon préparation, etc.). Afin d'être au plus près de la réalité (type d'objets, poids, volume, degré de précision souhaité), une certaine relativité dans la logique des définitions a été tolérée. Ainsi, une cote peut tantôt se référer à un local (E13), à une partie de bâtiment (E6, E12, E15), ou à une structure de stockage (E8, E10, E11). Bien que les noms des entrepôts et unités de stockage soient le plus didactique possible, les lieux de stockage (ville, bâtiment, bureau) sont parfois implicites³.

Entrepôts et unités de stockage	
E1	Château, collection
E2	Chaumont, cave
E3	Spira
E4	Château, cour intérieure
E5	Château, oubliettes
E6	Voirnet, étage
E7	Chaumont, Compactus (bureau SID)
E8	Chaumont, CP (bureau SID)
E9	Château, bout du tunnel
E10	Chaumont, analyses (2 ^e étage)
E11	Chaumont, folex (2 ^e étage)
E12	Voirnet, abri antiatomique
E13	La Bruntrutaine
E14	Voirnet, extérieur
E15	Voirnet, rez
E16	Chaumont, bureau SID
E17	Pavillon Fontenais
E18	Voirnet garage

1.5 Nomenclature des cotations topographiques

Tous les prélèvements et relevés sont stockés dans un entrepôt et dans une structure de stockage; parfois, ils sont rangés dans un conteneur numéroté (caisses RAKO). Comme les fichiers des chantiers contenaient historiquement deux descripteurs pour les rangements dans les armoires de la collection du Château (descripteur *armoire*, descripteur *tiroir*), nous avons simplement rajouté un descripteur pour créer un modèle de cotation topographique (au sens des métiers de l'archivistique, bibliothéconomie et information documentaire), qui permette de situer chaque prélèvement et relevé. La condition était que le modèle soit universel, c'est-à-dire que chaque objet de la paléontologie A16 puisse être situé à l'aide d'un système de cotation standard. Ce code, fondé sur trois descripteurs, est appelé « cote de rangement » ou tout simplement « cote ».

Comme déjà évoqué à propos des codes d'entrepôts et d'unités de stockage, ce système à l'avantage d'être à la fois standardisé et au plus près de la réalité, de la diversité des objets PAL A16 d'une part, des différents entrepôts et unités de stockage d'autre part.

Cotations topographiques		
1	code entrepôt	entrepôt de E1 à E18
2	code S+O	structure de stockage (2 lettres) + numéro de l'occurrence (chiffre)
3	code d'affinement	numéro de tiroir, de box ou niveau d'une étagère

Il y a par conséquent quelques distorsions au sein du modèle, où certaines cotes permettent de situer un objet de manière plus précise que d'autres. Par exemple, au Voirnet-rez (E15), le deuxième terme d'une cote se réfère à l'une des étagères métalliques (VM1, VM2, etc.) et le troisième au niveau « vertical » dans lequel une palette est rangée (0, 1, 2, 3, etc.), si bien qu'une même cote se réfère à plusieurs palettes (E15, VM2, 4 signifie: dans l'entrepôt Voirnet-rez, dans l'étagère métallique 2, au niveau 4). Au château (E1), le deuxième terme se réfère à l'une des armoires (AC1 à AC25, etc.) et le troisième à l'un de ses tiroirs (1 à 32). À Spira (E3), pour un moulage de traces, le deuxième terme se réfère à la section de la gigantesque étagère en bois (SB1 à SB20) alors que le troisième terme se réfère au niveau (0 à 5). Concernant le troisième terme, notons que le 0 (zéro) se réfère au niveau du sol; si la structure de stockage comporte un niveau plancher, nous lui attribuons le niveau 1. Enfin, certaines cotes ne sont pas utilisées de manière complète, car nous n'en avons pas vu la nécessité.

Les caisses RAKO sont un cas particulier: elles sont, dans les fichiers de chantier, uniquement reliée à l'entrepôt, le deuxième terme étant réservé pour l'appellation « RAKO » et le troisième pour le numéro de la caisse. À titre d'exemple, le fichier chantier indique simplement que la RAKO 249 est à Spira (E3); la structure de stockage (SM13) et le numéro de box (15) n'apparaissent pas formellement. Du point de vue théorique, la cote complète comprendrait cinq termes: E3, SM13, 15, RAKO, 249. La même pratique existe avec les palettes, mais nous l'avons fort peu utilisée, car il était surtout question de stockage temporaire avec ce type de support. Néanmoins, quelques cas existent, les tranches sédimentaires de traces par exemple, polies ou non.

Localisations							
E1, AC25, 28	E1	Château, collection	armoires	25	ac	tiroirs	32
E1, AV4, 6	E1	Château, collection	armoires vertes	4	av	rayons	6
	E2	Chaumont, cave	étagères bois	12	cb	niveaux	3
	E2	Chaumont, cave	armoires	5	ca	tiroirs	N/A
	E3	Spira	étagères bois	20	sb	niveaux	5
	E3	Spira	étagères métal.	15	sm	box	15
	E4	Château, cour intérieure					
	E5	Château, oubliettes					
	E6	Voirnet, étage					
	E7	Chaumont, Compactus (bureau SID)					
	E8	Chaumont, CP (bureau SID)					
	E9	N/A					
	E10	Chaumont, analyses					
	E11	Chaumont, folex					
	E12	Voirnet, abri antiatomique					
	E13	La Bruntrutaine					
	E14	Voirnet, extérieur					
	E15	Voirnet, rez					
	E16	Chaumont, bureau SID					
	E17	Pavillon Fontenais					
	E18	Voirnet garage					

2 Données physiques

2.1 Prélèvements de terrain

La sous-sous-collection « ichnologie » est comprise dans la collection de la Paléontologie A16, plus précisément dans l'ensemble des objets appartenant à la période du Mésozoïque.

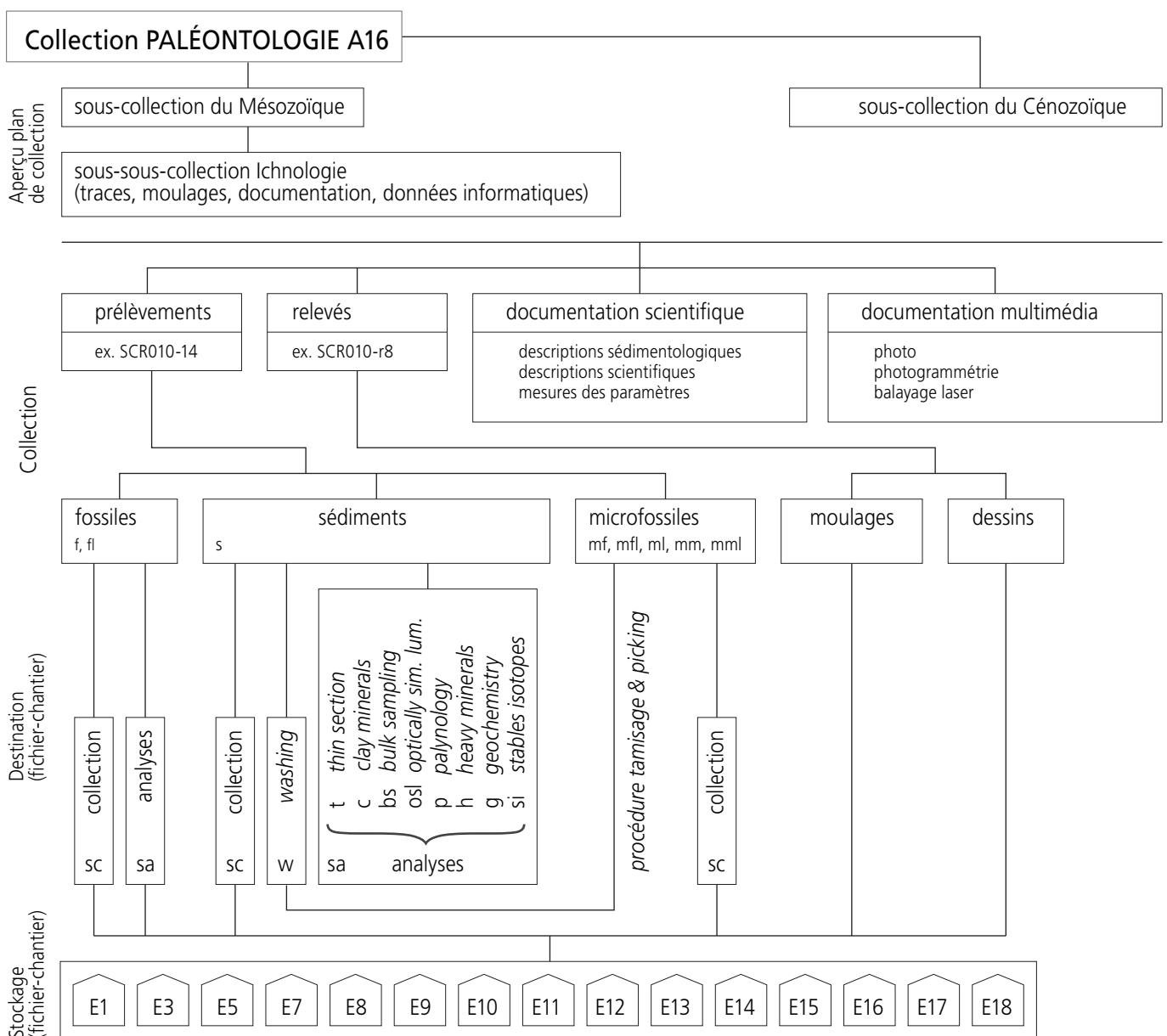
Par le terme de prélèvement, il faut comprendre qu'il ne s'agit pas uniquement de fossiles; la terminologie de la Paléontologie A16 désigne les objets excavés en tant que « prélèvements », avec deux sous-groupes, les fossiles, qui se réfèrent à la paléontologie, et les sédiments, qui sont de l'ordre de la géologie. Bien que l'interaction entre les fossiles et les sédiments soit très forte dans le cadre de la compréhension globale d'un phénomène, cette distinction s'avère utile dans la mesure où, en principe, la destination finale d'un prélèvement diffère en fonction de cette dualité, les fossiles étant préparés puis mis en collection, tandis

que les sédiments partent le plus souvent en analyses physico-chimiques, avec ou sans retour. Les emplacements et conditions d'entreposage diffèrent également, même si une certaine flexibilité est conservée : par exemple, de rares sédiments peuvent être rangés en tant qu'échantillon de collection s'ils portent comme indication de destination la valeur « sc » (*samples collection*).

2.2 Entreposage

Du point de vue de l'entreposage, les prélèvements de terrain peuvent être divisés en deux groupes, selon leur volume et le type de préparation.

Premièrement, les parties de dalles à traces, préparées selon un protocole précis utilisant entre autre du mortier et une plaque métallique, plutôt volumineuses (entre 10 et 100kg), stockées sur palette dans des étagères métalliques de type Schäfer 2000 kg.



Deuxièmement, les traces et figures sédimentaires, ainsi que tout autre petit prélèvement (<10 kg), qui ont pour la plupart fait l'objet d'une préparation fine, et qui sont stockés par site et par couche, et non pas par site et par année comme le reste de la collection. Il y a deux groupes : d'un côté les traces et figures sédimentaires, de l'autre le reste, donc tout ce qui est en principe ni traces ni figures sédimentaires.

Notons que l'entreposage des prélèvements de traces ne se situe donc pas dans les armoires de la collection où sont rangés la plupart des fossiles (entrepôt E1).

2.3 Relevés de terrain

En dehors des prélèvements, la collection « ichnologie » englobe un grand nombre de relevés de terrain. La catégorisation en prélèvements et relevés est importante dans la mesure où l'ensemble des données s'articule autour de ce binôme. Ensuite, il y a deux sous-catégories de relevés de terrain : les moulages et les dessins.

2.3.1 Moulages

L'opération de moulage comprend la production de négatifs de fossiles en silicone que dénommés moules pour ceux réalisés sur le terrain (traces de tridactyles et saupodes) et matrice pour ceux réalisés en laboratoire (souvent des copies de traces prélevées ou moulées, donc stockées en entrepôt et par conséquent réalisée en laboratoire). À partir des négatifs en silicone sont produits des tirages, considérés de manière un peu subtile comme des relevés de terrain : bien que l'opération soit réalisée en laboratoire, la source vient du terrain, via le moule. En revanche, les matrices ne sont à contrario pas des relevés, et sont de facto rangées et listées séparément.

2.3.2 Dessins

La catégorie des dessins comprend les dessins de traces et de limites sédimentaires, ainsi que les leviers de coupes stratigraphiques. La seule complexité documentaire réside dans la diversité des supports, qui implique un rangement différent selon que nous avons affaire à des monofilms (folex) ou à des feuilles de format A4 ou A3. Les premiers sont rangés dans une structure de stockage dédiée (**Chaumont folex E11**), les secondes sont consignées avec la documentation manuscrite (**Compactus E7**).

2.4 Entreposage

L'ensemble des dessins est stocké soit dans les classeurs de documentation rangés dans un compactus (E7), soit dans le meuble à folex construit spécifiquement, grâce au savoir-faire des techniciens de fouille (E11).

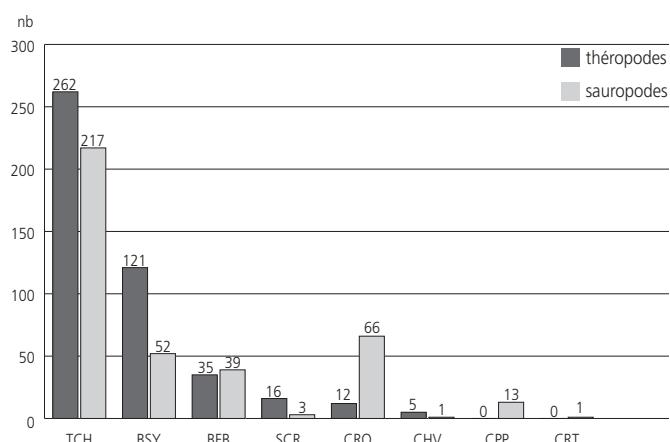
3 Aperçus quantitatifs de la collection

Physiquement, la collection est principalement composée de prélèvements (1), de moulages (2) et de dessins (3). Tous ces objets sont issus du terrain, à l'exception des tirages, qui proviennent en réalité des moules de terrain en silicone, c'est-à-dire d'une production en

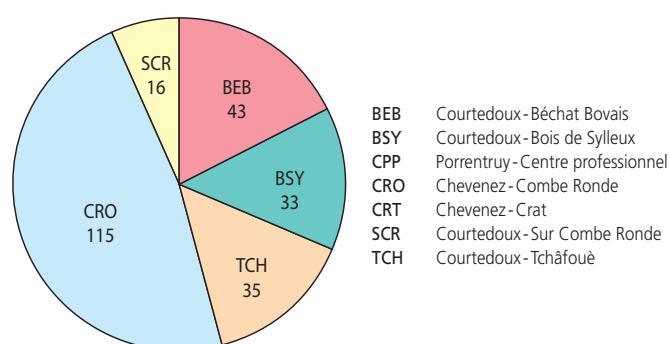
laboratoire. Toutefois, nous les avons considérés comme des relevés de terrain également, par souci de simplification.

Concernant les prélèvements, nous pouvons simplement relever que relativement peu de traces ont été prélevées sur les 14 000 documentées. Il y a environ 800 prélèvements, ce qui correspond à un nombre de traces inférieur à 2000, le chiffre exact n'existant pas. Bien évidemment, la raison en est que le sciage ou l' extraction de traces n'est pas une opération simple à réaliser. Il a fallu parfois découper des morceaux de dalle à traces à la scie circulaire. Certains prélèvements pèsent plus de 500 kg !

Concernant les moulages, leurs données se décomposent en moules de silicone et tirages de polyester. Nous retenons uniquement les moules de terrain en silicone pour l'appreciation quantitative, pour une seule raison, de grande importance toutefois : les moules portent le numéro d'inventaire de l'année durant laquelle ils ont été réalisés, tandis que les numéros des tirages sont plus subtils. En effet, nous avons attribué un numéro de tirage qui correspond à l'année du premier tirage d'un moule donné, si bien qu'un écart de plusieurs années peut se produire et se manifester dans le code d'inventaire. Cela crée un biais : le numéro d'inventaire d'un tirage ne correspond pas forcément à un chantier. Il y a par exemple un tirage CRE014-r1 mais il n'y a pas eu de chantier au Creugenat en 2014. Il correspond, en fait, à l'année de la fabrication du premier tirage. Autre élément d'importance :



Nombre de prélèvements par site.



Nombre de moulages par site.

tous les tirages qui suivent un premier tirage portent le même numéro d'inventaire, indépendamment de leur année de fabrication. Par exemple, TCH005-r136 est le numéro de tirage pour 120 pièces. Si une nouvelle matrice est réalisée à partir de la matrice d'origine, faite sur le terrain, le processus est en revanche relancé. Il s'agit dès lors de tirage à partir d'une matrice de laboratoire, numérotée telle quelle (MAT 90, p. ex.)

Concernant les dessins, nous dirons pour schématiser qu'il en existe trois types: les monofilms (folex), qui généralement sont le support de dessin de traces en taille réelle, les relevés A4 de traces et failles, et les relevés de coupe stratigraphique. Il s'agit là des dessins originaux, qui ont servi de base de travail à l'élaboration du dessin assisté par ordinateur (DAO) et ensuite d'assemblage des documents électroniques, lesquels permettent *in fine* d'imprimer un plan d'une zone de dalle à traces, voire une dalle complète, dans l'absolu.

4 Données manuscrites

Les données originales saisies sur le terrain constituent ce que nous appelons la « documentation de terrain ». Elle est consignée dans des classeurs fédéraux mis dans un compactus (E7). Le fait que la documentation soit rangée par site et par année (SCR002, SCR003, SCR004, etc.) n'a pas pu être appliqué uniformément, si bien que la documentation de certains sites à traces est classée par thématique, sans tenir compte des années. Outre les dessins originaux au format A4, les classeurs contiennent un certain nombre de fiches manuscrites – par opposition, nous dénommons les données électroniques par « fichier *lambda* » (p. ex., le fichier-chantier est un fichier électronique): fiche des prélèvements, qui contient la liste des fossiles trouvés accompagnés des informations les plus importantes (numéro du fossile, type, destination, systématique, nom du préleveur, date, informations de géolocalisation, etc.), fiche des relevés, construite sur le même mode que la fiche des prélèvements, avec la liste des dessins de terrain et des moules en silicones fabriqués *in situ*. Nous trouvons également dans les classeurs les cahiers journaliers de terrain, qui permettent de consigner au jour le jour un bon nombre d'information et d'appréciations. Les données des carnets de terrain ne sont pas dédoublés, ni scannées ni numérisées. Par contre, elles existent en copie dans les classeurs de sauvegarde rangés au Château. Malgré tout, la sauvegarde papier n'est pas terminée à fin 2014. Nous trouvons ensuite dans les classeurs, les données de terrain relatives à la géolocalisation effectuée par l'équipe de géomatique, ainsi que les fiches de décapage à la machine lorsque ces opérations ont été pratiquées,

à savoir sur tous les grands chantiers. Enfin, concernant la partie ichnologie, nous y avons consignées toutes les fiches de mensuration des paramètres liés aux traces.

En principe, ces fiches reflètent l'état de la documentation telle qu'elle s'est construite au jour le jour sur le terrain; cela signifie que nous ne les avons pas modifiées *a posteriori*, même lorsque cela aurait été nécessaire. Par conséquent, en cas d'absence de convergence des données, les données électroniques et les fichiers-chantiers ont force de justesse par rapport aux fiches manuscrites. Cet état de fait concerne principalement la détermination en systématique paléontologique et l'anatomie des fossiles. Concernant les numéros des empreintes et pistes, des correctifs ont été exceptionnellement appliqués.

En résumé, voici la liste des principaux documents manuscrits figurant dans la documentation de terrain:

- fiches des prélèvements
- fiches des relevés
- fiches de décapage machine
- fiches de mensuration des paramètres de traces
- carnets journaliers de terrain
- données de géolocalisation (équipe de géomatique)
- relevés originaux au format A4
- descriptions scientifiques des pistes et des empreintes
- descriptions sédimentologiques des couches et relevés stratigraphiques.

5 Données informatiques de la PAL A16

Le patrimoine informationnel est réparti entre la documentation de terrain, consignée dans des classeurs, et les données informatiques, présentes sur plusieurs supports de stockage : données du serveur, dont une partie provient du scannage ou de la saisie des données de terrain se trouvant dans les classeurs, supports discographiques (cd/dvd), disques durs (données 3D produites par mandat externe). Les données se recoupent ou non sur différents supports, et leur cartographie peut s'avérer complexe.

6 Données 3D externes

La PAL A16 possède plusieurs disques durs et cd/dvd de prestataires externes (Pöry Infra AG, Terradata AG) concernant le scannage 3D et les orthophotos de certaines dalles à traces. Il s'agit de formats classiques pour les photos (tiff, voire jpeg), et principalement de format Autocad pour les maillages 3D.

Notes

- 1 Système de gestion de base de données relationnelles.
- 2 Cela ne signifie pas que les dates de prélèvement se suivent de la plus ancienne à la plus récente en parallèle des numéros, à savoir, numéro 1, prélèvement du premier jour de fouille, numéro le plus grand, prélèvement du dernier jour de fouille. Il y a eu bon nombre de variantes durant les fouilles; des lots de numéros ont été attribués aux différentes équipes. Les numéros restent, du point de vue théorique, arbitraires.
- 3 Cet état de fait est pallié par le référentiel de localisation d'iPal (SGBDR en développement en août 2014).

Annexe 2

Méthode pour réaliser les plans des pistes isolées

Dans Adobe Illustrator CS5

Préparer un fichier intermédiaire par couche pour toutes les pistes :

- ouvrir le plan synoptique de surface *sy-su.ai* de la couche
- enregistrer une copie intermédiaire de ce fichier, qui sera nommé *site_couche_intermédiaire*
- changer la couleur du fond pour différencier ce fichier du plan synoptique de surface
- mettre en gris 50% toutes les limites de la couche
- mettre en gris 50% toutes les empreintes (tous les types de lignes)
- mettre en gris 50% tous les numéros d'empreintes
- mettre en gris 50% et en taille 8 pts tous les numéros de pistes
- supprimer les calques inutiles pour les pistes isolées
- enregistrer le fichier intermédiaire.

Isoler une piste

– ouvrir le fichier intermédiaire et enregistrer une copie au nom de la piste

- sélectionner tous les calques sauf le calque *entête*
- vérifier que tout soit sélectionné dans tous les autres calques
- tourner le tout de sorte que la flèche de la piste pointe \pm verticalement vers le haut (la rotation correspond à l'angle de sortie du fichier *orientation pistes isolées.xls*)
- déplacer l'*entête* dans une zone \pm en haut à droite de la flèche de la piste
- tourner la flèche de l'*orientation* dans le sens du nord dans sa rosette, selon la rotation effectuée auparavant
- créer un calque *repères*
- copier/coller *selon les calques* le groupe *recadrage* depuis le fichier *repères piste isolée.ai* (gabarit ci-contre)

ligne noire : alignement du groupe *recadrage* sur la limite d'impression supérieure (ligne pointillée)

ligne jaune : emprise du plan

ligne bleue : position des numéros de pistes

ligne rouge : position des têtes de flèches du sens de piste
ligne verte : découpage des failles

- adapter ces cadres à la piste à isoler (\pm largeur de la piste plus 1 m de chaque côté), tout en observant la cohérence des objets représentés ; ne pas changer les distances entre les cadres (5,5 et 6,5 mm)

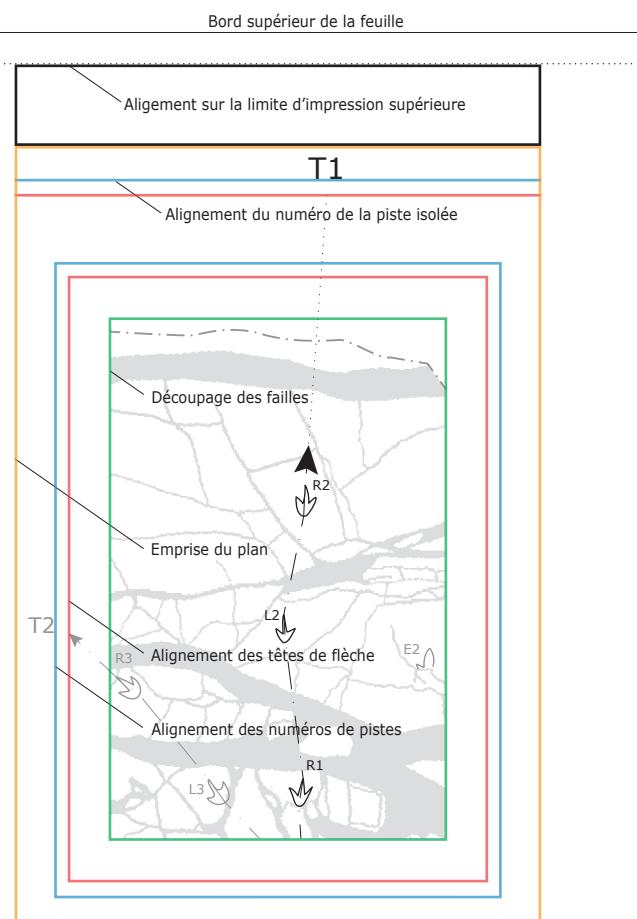
- dans les calques *pistes + empreintes + limites*, effacer tout ce qui dépasse le cadre vert tout en observant la cohérence des objets représentés avant de les couper

- si l'on coupe une ligne médiane, le reste de la ligne médiane de la piste continue jusqu'au cadre rouge

- placer les symboles des flèches pour les pistes secondaires sur les lignes médianes coupées ou prolongées des pistes secondaires

- le calque de la piste à isoler devient le calque principal (à placer au-dessus des autres calques de pistes ou de traces)

- remettre en noir 100% toutes les empreintes de la piste principale (tous les types de lignes)
- remettre en noir 100% tous les numéros d'empreintes de la piste principale
- remettre en noir 100% et en taille 11 pts le numéro de la piste principale
- placer le symbole de la flèche et le numéro de la piste principale sur les limites du cadre correspondantes
- déplacer les pistes et les empreintes restantes dans un calque « autres » en respectant la hiérarchie
- redresser les numéros d'empreintes, selon l'angle inverse de la rotation effectuée précédemment
- réaménager les numéros d'empreintes
- dans le calque *coo loc*, placer le symbole du point d'origine vers la zone de l'*entête*
- tourner le symbole dans le sens des coordonnées locales, selon l'angle de rotation + l'angle d'origine
- dans le calque *coo féd*, placer le symbole du point d'origine vers la zone de l'*entête*



- tourner le symbole dans le sens du nord, selon l'angle de rotation noté auparavant
- calculer et ajouter en texte les coordonnées à partir des points d'origine de l'assemblage (pour faciliter le calcul des coordonnées, placer une grille de 10m x 10m sous les croix du carroyage d'origine)
- effacer, de tous les côtés, les croix des carroyages qui sont en trop et la grille de calcul
- enregistrer (ce dessin correspond au fichier principal)
- enregistrer une deuxième fois sous *même nom_failles.ai* (ce document temporaire sera supprimé après le placement des failles)
- dans le calque *failles*, créer une zone de recadrage, dimensions selon l'intérieur du cadre vert
- formater les failles: fond noir, transparence zéro
- supprimer tous les calques, à l'exception de celui des failles
- enregistrer et fermer le fichier
- ouvrir le document *même nom_failles.ai* dans Photoshop.

Dans Adobe Photoshop CS5

- options de page :
 - recadrer selon : cadre de sélection
 - lissé : décoché
- taille de l'image :
 - conserver les proportions : coché
 - Résolution : 200
 - mode : niveaux de gris
 - ok
- menu : image/réglages/courbes :
 - entrée : 2
 - sortie : 100
 - ok
- menu : image/mode(bitmap) :
 - fusionner les calques : ok
 - sortie : 200
 - mode avec : *50% de seuil ou diffusion* pour des failles plus fines
 - ok
- enregistrer sous *n° de piste-failles.tif* (ce document temporaire sera supprimé après le placement des failles) :
 - options : TIFF
 - compression : LZW
 - ordre : entrelacé
 - format : Mac
 - ok
 - fermer le fichier

Dans Adobe Illustrator

- ouvrir le fichier principal de la piste
- importer sans lien le fichier *n° de piste-failles.tif* dans le calque *failles*

- le positionner dans le cadre vert
- ajuster la position exacte en observant des pixels à zoom maximal
- effacer les anciens éléments du calque «failles» : il ne restera qu'un seul élément dans ce calque : le nouveau «.tif»
- régler le calque «failles» à 15% de noir pour l'afficher en gris
- formater le document en A4, orientation *portrait* (210 mm x 297 mm)
- pour les pistes plus longues, on choisira un multiple de A4 en hauteur en fonction des marges d'impression (p. ex. : plan de travail = Larg 202 mm x Haut 577 mm pour 2 pages ou x Haut 866 mm pour 3 pages)
- régler les options d'impression : Mosaïque → Zones imprimables
- placer le cartouche «entête» en haut à droite à 2 mm des marges d'impression de la feuille
- aligner en haut tout le dessin au moyen du cadre noir du groupe «recadrage» sur la limite d'impression supérieure de la page 1
- centrer latéralement le dessin entre la limite d'impression gauche et l'entête

Si le dessin contient des pistes de théropodes ou de sauropodes zoomées à l'échelle 1:20 :

- copier le groupe «cadre» correspondant aux besoins depuis «modèle piste isolée.ai»
- coller le groupe «cadre» dans le calque de la piste isolée
- aligner le cadre à 2 mm sous le cartouche «entête»
- corriger/compléter le titre du cadre
- copier la piste principale et la coller à l'échelle 1:20 en dehors du cadre
- associer le groupe de la piste copiée et le groupe du cadre, renommer ce groupe zoom
- placer les numéros des empreintes copiées dans le cadre selon les normes définies
- découper l'axe de la piste principale copiée avant et après chaque empreinte
- insérer séparément les empreintes zoomées dans le cadre selon les normes définies
- appliquer un fond blanc aux contours *prin* de ces empreintes pour masquer l'axe
- ajuster le cadre des zooms au-dessous de la première empreinte selon les normes définies
- supprimer les lignes *int* pour la piste principale et les pistes secondaires, mais pas dans les zooms
- supprimer le calque *recadrage*
- enregistrer et fermer le fichier

Dans Finder

- effacer les documents intermédiaires

Annexe 3

Méthode pour déterminer les orientations et la longueur des pistes

Préparer la détermination des orientations

- créer un nouveau dossier nommé *plans orientations*;
- enregistrer une copie du plan sy-su de la couche concernée dans ce nouveau dossier;
- renommer le fichier copié en *site_couche orientations*;
- ouvrir le fichier, supprimer les calques Illustrator inutiles à la détermination des orientations;
- placer et compléter l'en-tête et la vignette de localisation de la couche;
- créer un calque *orientations* pour y dessiner les éléments suivants.

Pour les pistes de sauropodes

- dans le sens de marche de la piste, relier le centre de la première empreinte de pied droit ou gauche avec le centre de l'empreinte de latéralité opposée suivante par un segment de polygone rectangulaire (cela pour avoir l'indication du centre de cette droite de liaison).

Pour les pistes de théropodes

- dans le sens de marche de la piste, relier la pointe du doigt III (doigt du milieu) de la première empreinte de pied droit ou gauche avec la pointe du doigt III de l'empreinte de latéralité opposée suivante par un segment de polygone rectangulaire.

Pour toutes les pistes

- dupliquer cette droite entre tous les centres, respectivement pointes, des empreintes de pieds suivants; si le contour d'une empreinte n'est pas complet, le centre de l'empreinte ou le doigt III est estimé; si des empreintes manquent, veiller à toujours relier des empreintes alternées: droite → gauche ($R \rightarrow L$) ou gauche → droite ($L \rightarrow R$), même si cela implique que certaines d'entre elles ne soient pas prises en compte;
- associer tous les segments construits dans un groupe *P* (pieds) pour les sauropodes ou *T* pour les théropodes/tridactyles ? dans le calque *orientations*;
- dans le sens de marche de la piste, relier par un tracé construit avec l'outil *plume* tous les centres des segments de polygone rectangulaire;
- renommer ce tracé *mg* (médiane géométrique) dans le calque *orientations*;
- copier le premier segment de *mg* et le coller au début de cette dernière;
- renommer ce segment d'entrée *e*;
- copier le dernier segment de *mg* et le coller à la fin de cette dernière;
- renommer ce segment de sortie *s*;
- ajuster la longueur des segments *e* et *s* à la longueur de la piste en veillant à ne pas modifier les angles;
- relier par une droite les deux extrémités de *mg* (ces deux extrémités correspondent aux points d'accrochage des segments *e* et *s* sur *mg*);
- renommer cette ligne directe *dir*.

Déterminer les orientations

- placer un repère horizontal Illustrator sur la première extrémité du segment *e* (au début par rapport au sens de marche);
- utiliser cette extrémité du segment *e* comme point de rotation et le faire pivoter vers la droite (dans le sens horaire ou antihoraire) pour l'aligner sur le repère horizontal Illustrator;
- lire la valeur de l'angle de rotation indiqué dans la fenêtre information d'Illustrator et reporter manuellement cette valeur dans le tableau Excel (indiquer la valeur en + ou en -);
- procéder de même avec la ligne directe *dir* et avec le segment de sortie *s*; veiller à toujours utiliser comme point de rotations la bonne extrémité de la ligne *dir* ou du segment *s* par rapport au sens de marche de la piste et à reporter correctement les valeurs dans le tableau Excel.

Après avoir déterminé une des orientations

- annuler la rotation des segments *e* ou *s* pivotés pour revenir à une visualisation correcte du plan.

Mesurer la longueur d'une piste à l'aide des éléments construits précédemment

- sélectionner et copier ensemble les segments *e* et *s* ainsi que tout le tracé *mg* d'une piste;
- coller en place ces trois éléments dans le calque *orientations*;
- joindre ces trois éléments et renommer le nouvel objet *lg* (longueur);
- lire la longueur de l'objet *lg* indiquée dans la fenêtre information sur le document/objet d'Illustrator et reporter manuellement cette valeur dans le tableau Excel.

Après avoir mesuré la longueur

- dans le calque *orientations*, associer tous les éléments construits pour une piste;
- renommer le groupe avec le numéro de la piste;
- enregistrer le fichier.

Recommencer le processus pour la piste suivante.

Pour terminer le travail sur une couche

- associer toutes les pistes de sauropodes ensemble et toutes les pistes de théropodes/tridactyles ensemble;
- renommer ces deux groupes en *S* ou *T* selon le type de piste.

Recommencer tout le processus pour la couche suivante.

Remarque : les abréviations *e*, *s* et *dir* utilisées dans cette méthode ont été reportées dans les fichiers statistiques avec les majuscules correspondantes *E*, *S* et *D*.

Annexe 4

Méthode pour réaliser les plans de direction des pistes

Préparer le document

- enregistrer une copie du plan orientations de la couche concernée;
- renommer le fichier copié en *site_couche directionnels*;
- ouvrir le fichier et le réduire à une échelle pour que toute la couche prenne place sur une page A4; veiller à choisir une échelle identique pour l'ensemble des couches du site; choisir un facteur de réduction en fonction de la plus grande couche;
- placer et compléter l'en-tête et la vignette de localisation de la couche.

Dessiner la direction des pistes

- dans le calque orientations, supprimer tous les éléments, sauf les *lg*;
- sélectionner toutes les *lg* et les convertir en flèches; contrôler que toutes les flèches pointent dans la bonne direction par rapport au plan orientations;
- mettre en forme les flèches selon les standards; les pistes de sauropodes *S* sont représentées par des traits continus, alors que les pistes de théropodes *T* sont représentées par des lignes traitillées;

- dans le calque pistes, supprimer tous les éléments, sauf les numéros de piste et les lignes pointillées de liaison;
- associer les numéros ensemble et associer les liens ensemble; renommer ces deux groupes respectivement en *No* et *liens*;
- renommer le calque pistes en *No + liens*;
- mettre en forme les *No* et les *liens* selon les standards définis; disposer ces éléments de façon claire pour favoriser une lecture plaisante des plans;
- dans le calque *limites*, mettre en forme les contours de la couche selon les standards définis;
- dans le calque *limites*, ajouter les contours de la dalle complète pour avoir un aperçu de l'emplacement de la couche par rapport à la vue d'ensemble de la dalle; les contours simplifiés de l'ensemble de la dalle proviennent du fichier *toutes couches*;
- mettre en forme les contours de la dalle selon les standards définis; si nécessaire, couper et effacer les éléments qui débordent du format A4;
- dans le calque *limites*, renommer les groupes en *site* et *couche* (le groupe *couche* est supérieur);
- enregistrer le fichier.

Recommencer tout le processus pour la couche suivante.

Annexe 5

Lexique

Pour les termes français/anglais définissant les traces de dinosaures, voir le chapitre 6.1.1.4–Terminologie

Acrystral®: composite sans solvant à base d'une dispersion aqueuse d'un copolymère acrylique et d'une poudre à base de cristaux minéraux (réf. Acrystral Sàrl).

Agent thixotrope: additif permettant à certains fluides de passer de l'état liquide à l'état solide.

Autopode: extrémité distale des membres des vertébrés, constituant le pied ou la main. Il est composé lui-même de trois régions, le basipode (carpe ou tarse), le métapode (paume, plante de pied) et l'acropode (doigts) (www.dico-sciences-animautes.cirad.fr).

Azimut: en topographie, un azimut est un angle horizontal formé entre la direction du nord magnétique et celle d'une droite ou d'une direction quelconque; toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre depuis la direction du nord magnétique vers celle de la droite ou direction (indiquée de 0 à 360°) (www.aquaportal.com).

Bioturbation: ensemble des phénomènes de perturbation des sédiments liés à l'activité d'organismes vivants, comprenant les traces de déplacement, de reptation, de fouissement, de repos, de terrier, de galerie, de nutrition, etc. (www.geolsed.ulg.ac.be).

Carroyage: technique de quadrillage utilisée en topographie, afin de rassembler et de traiter des données en vue d'une exploitation cartographique ou statistique. Elle consiste à délimiter une surface en carrés identiques et permet de localiser l'endroit d'où a été extrait un objet, et de dresser la cartographie du lieu des fouilles. Il est identifié par un système de coordonnées locales et matérialisé sur le terrain par des fils tendus horizontalement ou des marquages au sol, à partir d'un point 0 repéré par théodolite (www.fr.wikipedia.org).

Cinématique: en physique, la cinématique est la discipline de la mécanique qui étudie le mouvement des corps, en faisant abstraction des causes du mouvement.

Coltogum® «SDB Coltogum® Colle de montage Super»: colle polyuréthane.

Diagenèse: désigne l'ensemble des processus physico-chimiques et biochimiques affectant un sédiment après son dépôt. Ils induisent la transformation progressive des sédiments en roches sédimentaires. Ces processus ont généralement lieu à faible profondeur, donc dans des conditions de pression et de température peu élevées (compaction, déshydratation, dissolution, cimentation, etc.).

Distance gléno-acétabulaire: la distance gléno-acétabulaire donne une indication de la taille du corps de l'animal, comprise entre l'épaule et la hanche. D'un strict point de vue anatomique,

elle correspond à la distance entre le centre de l'articulation de l'épaule (cavité glénoïdale) et le centre de l'articulation de la hanche (cavité acétabulaire). En ichnologie, cette valeur est estimée par des mesures sur les pistes. Il s'agit de prendre en compte la ligne médiane qui coupe le pas de deux pieds et le pas de deux mains successifs par le milieu.

Faciès (sédimentaire): fait référence à l'aspect d'une roche et a un intérêt descriptif. Le faciès est aussi bien déterminé par l'apparence visuelle, que par ses propriétés, sa structure, sa disposition. En prenant en compte ses constituants minéraux (caractères lithologiques) et les fossiles qu'elle contient (caractères paléontologiques), il permet de reconnaître, classer et déterminer le milieu de formation d'une roche (fluviatile, côtier, marin plus ou moins profond, etc.).

Figure sédimentaire: les figures ou structures sédimentaires constituent un important indicateur des conditions de transport et de dépôt des sédiments. Certaines sont caractéristiques d'un environnement bien particulier mais la plupart sont communes à plusieurs milieux de dépôt et nécessitent l'utilisation de critères complémentaires pour l'interprétation des paléoenvironnements (autres figures sédimentaires, fossiles, contexte général, p. ex.) (www.vanbour.files.wordpress.com).

Gelcoat: de l'anglais *gel coat*, « manteau de gel ». Couche de surface, ayant la consistance d'une pâte liquide, pouvant être renforcée au moyen d'un tissu, d'un mat ou d'une nappe. Le gel-coat est un mélange de résine, de silice colloïdale et de pigments (www.fr.wikipedia.org).

Géoparc: territoire aux limites bien définies et d'une superficie assez étendue pour contribuer au développement économique local. Il comprend un certain nombre d'héritages géologiques ou une mosaïque d'entités géologiques d'importance scientifique particulière, pour leur rareté, leur esthétique, leur histoire géologique ou leur valeur éducative. Il ne doit pas seulement avoir une signification géologique mais aussi écologique, archéologique, historique ou culturelle. L'importance géologique devra être reconnue par les autorités scientifiques du territoire compétentes en la matière. Le Réseau européen des Géoparcs et le Réseau mondial des Géoparcs sont soutenus par l'UNESCO (www.fr.wikipedia.org).

Hétéropodie: du grec *hetero*, « autre », et *podos*, « pied ». Correspond en ichnologie à la différence de surface entre les pieds et les mains d'une piste d'un animal quadrupède dont les membres antérieurs et les membres postérieurs sont de taille et de morphologie différentes. Elle est souvent utilisée pour la classification des pistes de sauropodes mais la manière dont elle est quantifiée n'est généralement pas clairement établie (Falkingham et al. 2016).

Holotype: on appelle espèce type l'espèce utilisée pour définir un groupe taxonomique. À partir de cette espèce, on établit la description et la caractérisation du groupe. L'holotype est le type original, explicitement désigné par l'auteur du nom dans la publication originale, et qui sert de référence (www.fr.wikipedia.org).

Ichnoespèce: certaines espèces sont dénommées à partir des traces fossiles qu'elles ont laissées. On les appelle ichnoespèces. Parfois, la concordance avec des squelettes voisins connus a pu être établie, mais pas toujours. Chez les dinosaures par exemple, on connaît un grand nombre d'empreintes bien définies mais sans pouvoir les attribuer à tel ou tel animal. Chaque empreinte bien caractérisée sera donc dotée d'un nom scientifique (genre et espèce) et une classification (en genre et en espèce seulement) sera établie pour l'ensemble de ces empreintes. La définition des ichnoespèces, à partir d'un échantillon, est constitué d'un nombre d'exemplaires suffisamment grand, chacun d'entre eux étant complet, pas ou peu déformé et l'holotype étant le spécimen le plus caractéristique de cet ensemble (www.dico-sciences-animautes.cirad.fr; www.geowiki.fr).

Ichnofossile: traces d'activité biologique fossilisées. Il peut s'agir de pistes trahissant des déplacements d'animaux, d'habitats (terriers, etc.), de traces de forages mécaniques ou biochimiques (roches, coquilles, etc.), ou autres (déjections, restes d'œufs, etc.) (www.futura-sciences.com).

Ichnotaxinomie: l'ichnotaxinomie a pour objectif de classer et de nommer avec précision les traces fossiles, c'est-à-dire un ensemble très hétérogène de structures sédimentaires résultant de diverses activités animales. Cette démarche s'impose, car il convient de disposer d'un vocabulaire international pour les études paléo-ichnologiques qui s'avèrent de plus en plus nécessaires dans les approches sédimentologiques, paléoécologiques et paléoéthologiques. Pour cela, les règles très strictes de la nomenclature binominale (ichnogenre – ichnoespèce), édictées par le code international de nomenclature zoologique, ont été retenues (Gaillard 2011).

Karst, relief karstique (du Karst, région de Croatie): type de relief affectant les pays calcaires, et principalement dû à la dissolution de leurs roches par les eaux météoriques chargées de gaz carbonique. On peut y distinguer des formes de surface (lapiaz, doline, vallée sèche, etc.) et des formes souterraines (cavité, résurgence, concrétion, etc.) (Foucault 2011).

KEIM Restauro®-Giess: mortier minéral pour moulage à base de liant hydraulique.

Laminites/biolaminites: roches sédimentaires composées de très fins litages résultant de l'action de courants marins. Sur la plateforme, la sédimentation provient principalement des événements de tempête, qui sont plutôt sporadiques. Lors des marées de tempête les sédiments du littoral adjacent sont mis en suspension et transportés sur la plateforme par des chenaux, puis déposés en fines couches. Ces particules sont incorporées dans les tapis microbiens, elles sont liées à des constructions

stromatolithiques planes. L'épaisseur des lamines ne dépasse pas quelques millimètres.

Métagode: segment médian de l'autopode des vertébrés, correspondant au métacarpe ou au métatarsé (paume, plante du pied) (www.aquaportal.com).

Monofilm ou « folex »: film polyester transparent utilisé pour dessiner sur le terrain à l'échelle 1/1.

Mowilith®: selon la fiche technique du CTS (conservation technique scientifique), il s'agit de la dispersion aqueuse d'un copolymère à base d'acétate de vinyle et d'ester acrylique.

Ontogénie/ontogenèse: décrit le développement progressif d'un organisme de sa conception à l'âge adulte, voire à sa mort (www.linternaute.com).

Ornithopode: sous-ordre de dinosaures ornithischiens dont les membres postérieurs rappellent, par leur structure et leur attitude, ceux des oiseaux. Ils étaient herbivores et caractérisés par une posture au moins occasionnellement bipède. Ils possédaient généralement de nombreuses dents pour mastiquer les feuilles. Présents dès le début du Jurassique, ils se sont diversifiés jusqu'à la fin du Crétacé (www.jurassic-world.com).

Ornithischiens: représentent un des deux grands groupes de dinosaures, comprenant uniquement des formes herbivores, l'autre groupe étant les Saurischiens. Les Ornithischiens, ou dinosaures « à bassin d'oiseau », sont ainsi nommés car les os de leur bassin sont disposés d'une façon qui rappelle superficiellement les oiseaux. Les différences entre les ornithischiens et les saurischiens sont principalement constatées au niveau du bassin. En dépit de leur nom, les Ornithischiens ne sont pas apparentés aux oiseaux, ces derniers ayant évolué à partir de dinosaures saurischiens (www.universalis.fr).

Orthophotographie: ou plus communément orthophoto, image obtenue par traitement d'un cliché aérien numérique ou argentique dont la géométrie a été redressée de sorte que chaque point soit superposable à une carte plane qui lui correspond. En d'autres termes, une orthophotographie semble être prise à la verticale de tous les points qu'elle figure, ces points étant situés sur un terrain parfaitement plat. Dans le cas concerné, toutes les photos sont regroupées puis assemblées selon une grille pour former une mosaïque dont les différents éléments se jouxtent sans superposition ni trou. Le résultat final est une zone photographique précise orthorectifiée et radiométriquement homogène (www.fr.wikipedia.org).

Paléogéographie: la paléogéographie reconstitue les différentes géographies qui se sont succédé au cours des millions d'années de l'histoire de la Terre. Les changements géographiques ont influé sur le monde vivant de façon significative. Les modifications et leurs répercussions sur la répartition des espèces animales et végétales au cours des temps font l'objet de la paléobiogéographie (www.universalis.fr).

Paratype: dans la nomenclature zoologique, un paratype est officiellement défini comme « tout spécimen d'une série typologique autre que l'holotype ». Une série typologique est le matériel cité dans la publication originale de la nouvelle espèce ou de la sous-espèce, et n'a pas été exclu par l'auteur. En effet, chaque espèce est définie par un spécimen (stocké dans une collection zoologique), mais la variabilité des espèces nécessite la conservation des variants de l'espèce (www.fr.wikipedia.org).

Photogrammétrie: technique permettant de déterminer les dimensions et les volumes des objets – à partir de mesures effectuées sur des photographies – et montrant leurs perspectives.

Plastiline®: pâte à modeler professionnelle et prête à l'emploi, convenant à de nombreuses réalisations.

Polyuréthane: polymère d'uréthane. Cette molécule organique entre dans la composition de diverses choses, comme par exemple la mousse de polyuréthane.

Relevé: action de déterminer et de noter la position, la configuration ou la disposition (croquis, plan). Elle permet d'enregistrer le plus fidèlement et explicitement possible les vestiges mis au jour.

Rhéologie: étude des phénomènes conditionnant l'écoulement et la déformation de la matière (plasticité, viscosité, élasticité) (www.cnrtl.fr).

Rides de courant: terme utilisé comme terme générique pour désigner les rides de courant et/ou les rides de vagues car la distinction formelle entre les deux n'a pas été faite systématiquement.

Substrat: formation géologique sur laquelle reposent les terrains ou les fossiles servant de référence. On parle ici de substrat aussi bien pour les strates sous-jacentes des niveaux contenant les objets étudiés, que pour parler de ces niveaux eux-mêmes quand ils sont considérés comme le support des fossiles.

Strate: ensemble sédimentaire homogène, compris entre deux surfaces à peu près parallèles. On parle également de banc (banc de calcaire, banc de grès, etc.) ou de couche. L'épaisseur d'une strate est très variable (du mm à plusieurs mètres). Les strates sont souvent regroupées en ensembles ayant en commun une composition lithologique homogène et que l'on date de la même période.

Stratigraphie: discipline qui étudie la succession des dépôts sédimentaires, disposés en strates. Elle permet d'établir une chronologie relative fondée sur les principes de stratigraphie : principe de continuité (une même couche a le même âge sur toute son étendue) et principe de superposition (de deux couches superposées, la plus ancienne est située au-dessous), avec parfois quelques exceptions.

Taphonomie: discipline de la paléontologie qui étudie les processus physiques, chimiques et biologiques qui interviennent entre la mort d'un organisme et sa découverte à l'état fossile.

Vallée sèche: voir karst.

Bibliographie générale

- Alexander R.McN. 1976: Estimates of speeds of dinosaurs. *Nature* 261, 129-130.
- Alexander R.McN. 1977: Mechanics and scaling of terrestrial locomotion. In: Pedley T.J. (ed.): *Scale effects in animal locomotion*. Academic Press, London, 93-110.
- Alexander R.McN. 1989: *Dynamics of dinosaurs and other extinct giants*. Columbia University Press, New York, 167 p.
- Alexander R.McN. 1991: Doubts and assumptions in dinosaur mechanics. *Interdisciplinary Science Reviews* 16.2, 175-181.
- Alexander R. McN. 2006: Dinosaur biomechanics. *Proceedings of the Royal Society B, Biological Sciences* 273.1596, 1849-1855.
- Allen J.R.L. 1989: Fossil vertebrate tracks and indenter mechanics. *Journal of the Geological Society of London* 146.4, 600-602.
- Allen J.R.L. 1997: Subfossil mammalian tracks (Flandrian) in the Severn Estuary, S.W. Britain: mechanics of formation, preservation and distribution. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences* 352.1352, 481-518.
- Avanzini M. 1998: Anatomy of a footprint: bioturbation as a key to understanding dinosaur walk dynamics. *Ichnos* 6.3, 129-139.
- Avanzini M., Piñuela L. & García-Ramos J.C. 2012: Late Jurassic footprints reveal walking kinematics of theropod dinosaurs. *Lethaia* 45.2, 238-252.
- Baird D. 1952: Revision of the Pennsylvanian and Permian footprints Limnopus, Allopus, and Baropus. *Journal of Paleontology* 26.5, 832-840.
- Barale G. & Contini D. 1976: La paléoflore continentale de l'Oxfordien supérieur du Jura septentrional: le gisement de l'Hôpital Saint-Lieffroy (Doubs). *Compte Rendu sommaire des séances de la Société géologique de France* 1, 7-9.
- Bates K.T. 2010: *Palaeontological consultation on federal highway A16 dinosaur tracksites (Canton Jura, NW Switzerland): importance and possibilities of laser scanning and photogrammetry*. Rapport d'expertise. Paléontologie et Transjurane 24, 16 p.
- Bates K.T., Breithaupt B.H., Falkingham P.L., Matthews N.A., Hodgetts D. & Manning P.L. 2008a: Integrated LiDAR & photogrammetric documentation of the Red Gulch dinosaur tracksite (Wyoming, USA). *8th Conference on Fossil Resources Utah*, 101-103.
- Bates K.T., Manning P.L., Vila B. & Hodgetts D. 2008b: Three-dimensional modelling and analysis of dinosaur trackways. *Palaeontology* 51.4, 999-1010.
- Bates K.T., Rarity F., Manning P.L., Hodgetts D., Vila B., Oms O., Galobart À. & Gawthorpe R.L. 2008: High-resolution LiDAR and photogrammetric survey of the Fumanya dinosaur tracksites (Catalonia): implications for the conservation and interpretation of geological sites. *Journal of the Geological Society of London* 165.1, 115-127.
- Becker D., Bocat L., Comment G., Paratte G., Rauber G. & Risso V. 2011: Paléontologie jurassienne et visite des fouilles sur le futur tracé de la Transjurane. Office de la culture : Paléojura, Porrentruy, 58 p.
- Behrensmeyer A.K. 1982: Time resolution in fluvial vertebrate assemblages. *Paleobiology* 8.3, 211-227.
- Behrensmeyer A.K. 1991: Terrestrial vertebrate accumulations. In: Allison P.A. & Briggs D.E.G. (eds.): *Taphonomy: releasing the data locked in the fossil record*. Plenum, New York, 291-335.
- Belvedere M. 2013: *Photogrammetric 3D model generation of selected Late Jurassic (Kimmeridgian) dinosaur tracks from Highway A16 (Canton Jura, NW Switzerland)*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 56, 10 p.
- Belvedere M. 2014: *Applied methodology for the generation of photogrammetric 3D models of selected Late Jurassic (Kimmeridgian) dinosaur tracks from Highway A16 (Canton Jura, NW Switzerland)*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 72, 7 p.
- Bert D. & Bersac S. 2011: Buts et méthodes du «levé de coupe». *Fossiles* 6, 49-61.
- Bertling M. & Insalaco E. 1998: Late Jurassic coral/microbial reefs from the northern Paris Basin – facies, palaeoecology and palaeobiogeography. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 139.3-4, 139-175.
- Billon-Bruyat J.-P. 2005: A «turtle cemetery» from the Late Jurassic of Switzerland. *3rd Swiss Geoscience Meeting 2005*, Zurich.
- Boss S.K. & Neumann A.C. 1993: Impacts of Hurricane Andrew on carbonate platform environments, northern Great Bahama Bank. *Geology* 21.10, 897-900.
- Bourrouilh-Le Jan F.G. 2007: Very high energy sedimentation (supratidal hurricane deposits) and Mid-Holocene highstand on carbonate platforms, Andros, Bahamas: An alternative view. *Sedimentary Geology* 199, 29-49.
- Braillard L. 2006: *Morphogenèse des vallées sèches du Jura tabulaire d'Ajoie (Suisse): rôle de la fracturation et étude des remplissages quaternaires*. GeoFocus 14, 224 p.
- Brand L.R. 1996: Variations in salamander trackways resulting from substrate differences. *Journal of Paleontology* 70.6, 1004-1010.
- Breithaupt B.H. & Matthews N.A. 2001: Preserving paleontological resources using photogrammetry and geographic information systems. In: Hamon D. (ed.): *Crossing Boundaries in Park Management. Proceedings of the 11th Conference on Research and Resource Management in Parks and on Public Lands*. The George Wright Society, Hancock, 62-70.
- Breithaupt B.H., Matthews N.A. & Noble T.A. 2004: An integrated approach to three-dimensional data collection at dinosaur tracksites in the Rocky Mountain West. *Ichnos* 11.1-2, 11-26.
- Breithaupt B.H., Southwell E.H., Adams T. & Matthews N.A. 2001: Innovative documentation methodologies in the study of the most extensive dinosaur tracksite in Wyoming. *Proceedings of the 6th Fossil Research Conference*, 113-122.
- Breithaupt B.H., Southwell E.H., Adams T. & Matthews N.A. 2006: The Red Gulch Dinosaur Tracksite: public participation in the conservation and management of a world-class paleontological site. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin* 34, p. 10.

- Brown T. 1999: *The science and art of tracking – Nature's path to spiritual discovery*. Berkley Books, New York, 219 p.
- Brusatte S.L., Benson R.B.J. & Hutt S. 2008: *The osteology of Neovenator salerii (Dinosauria: Theropoda) from the Wealden Group (Barremian) of the Isle of Wight*. Palaeontographical Society, London, 75 p.
- Buffetaut E. 1988: Les restes de dinosaures de l'Oxfordien supérieur de Damparis (Jura): preuves d'émerison sur place. *Revue de Paléobiologie* 7.2, 301-306.
- Cariou E., Olivier N., Pittet B., Mazin J.-M. & Hantzpergue P. 2014: Dinosaur track record on a shallow carbonate-dominated ramp (Loule section, Late Jurassic, French Jura). *Facies* 60.1, 229-253.
- Carmona I.S., Bournod C., Ponce J.J. & Cuadrado D.G. 2012: The role of microbial mats in the preservation of bird footprints: a case study from the mesotidal Bahía Blanca Estuary (Argentina). In: Noffke N & Chafetz H. (eds.): *Microbial Mats in Siliciclastic Depositional Systems Through Time*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication 101, 37-45.
- Carrano M.T. & Wilson J.A. 2001: Taxon distributions and the tetrapod track record. *Paleobiology* 27.3, 564-582.
- Carvalho I.S., Borghi L. & Leonardi G. 2013: Preservation of dinosaur tracks induced by microbial mats in the Sousa Basin (Lower Cretaceous), Brazil. *Cretaceous Research*, 112-121.
- Castanera D., Pascual C., Canudo J.I., Hernández N. & Barco J.L. 2012: Ethological variations in gauge in sauropod trackways from the Berriasian of Spain. *Lethaia* 45.4, 476-489.
- Castanera D., Pascual C., Razzolini N.L., Vila B., Barco J.L. & Canudo J.I. 2013: Discriminating between Medium-Sized Tridactyl Trackmakers: Tracking Ornithopod Tracks in the Base of the Cretaceous (Berriasian, Spain). *PLoS ONE* 8.11:e81830.
- Castanera D., Belvedere M., Marty D., Paratte G., Cattin M., Lovis C. & Meyer C.A., à paraître: A walk in the maze: Variation in Late Jurassic tridactyl dinosaur tracks - A case study from the Late Jurassic of the Swiss Jura Mountains (NW Switzerland). *PeerJ*.
- Charollais J., Wernli R., Meyer C.A. & Clavel B. 2007: Découverte d'empreintes de dinosaures dans le Berriasien du Jura méridional (Ain, France). *Archives des Sciences* 60.1, 33-40.
- Chevallier T. 1989: *Les formations carbonatées de la séquence ptérocéienne (Kimméridgien pars) dans le Jura français et les régions voisines*. Cahiers de l'Institut catholique de Lyon, Série Sciences 2, 194 p.
- Cobos A., Gascó F., Royo-Torres R., Lockley M.G. & Alcalá L. 2016: Dinosaur tracks as "four-dimensional phenomena" reveal how different species moved. In: Falkingham P.L., Marty D. & Richter A. (eds.): *Dinosaur tracks – The next steps*. Indiana University Press, Bloomington, 245-254.
- Cohen A., Halfpenny J., Lockley M.G. & Michel E. 1993: Modern vertebrate tracks from Lake Manyara, Tanzania and their paleobiological implications. *Paleobiology* 19.4, 443-458.
- Cohen A., Lockley M.G., Halfpenny J. & Michel A.E. 1991: Modern vertebrate track taphonomy at Lake Manyara, Tanzania. *Palaios* 6.4, 371-389.
- Colombié C. 2002: *Sédimentologie, stratigraphie séquentielle et cyclostratigraphie du Kimméridgien du Jura suisse et du Bassin vocontien (France): relations plate-forme – bassin et facteurs déterminants*. GeoFocus 4, 198 p.
- Colombié C. & Strasser A. 2003: Les séquences de dépôt du Kimméridgien du Bassin vocontien (France): exportation de carbonates depuis les plates-formes peu profondes. *Geobios* 36.6, 675-683.
- Colombié C. & Strasser A. 2005: Facies, cycles, and controls on the evolution of a keep-up carbonate platform (Kimmeridgian, Swiss Jura). *Sedimentology* 52.6, 1207-1227.
- Colombié C. & Rameil N. 2007: Tethyan-to-boreal correlation in the Kimmeridgian using high-resolution sequence stratigraphy (Vocontian Basin, Swiss Jura, Boulonnais, Dorset). *International Journal of Earth Sciences* 96.3, 567-591.
- Comment G., Ayer J. & Becker D. 2011: Deux nouveaux membres lithostratigraphiques de la Formation de Reuchenette (Kimméridgien, Ajoie, Jura suisse) – Nouvelles données géologiques et paléontologiques acquises dans le cadre de la construction de l'autoroute A16 (Transjurane). *Swiss Bulletin für angewandte Geologie* 16.1, 3-24.
- Comment G. & Paratte G. 2013: Géologie et paléontologie en Ajoie: prospection dans des couches jurassiques. *Actes de la Société jurassienne d'Émulation* 116, 17-46.
- Comment G., Lefort A., Koppka J. & Hantzpergue P. 2015: Le Kimméridgien d'Ajoie (Jura, Suisse): lithostratigraphie et biostratigraphie de la Formation de Reuchenette. *Revue de Paléobiologie* 34.2, 161-194.
- Contejean C.L. 1859: Étude de l'étage kimmérid[g]ien dans les environs de Montbéliard et dans le Jura, la France et l'Angleterre. Chez l'auteur et les principaux libraires, Paris, 352 p.
- Contini D. & Hantzpergue P. 1973: Le Kimméridgien de la région de Montbéliard. *Annales scientifiques de l'Université de Besançon, Géologie* (3^e série) 18, 143-179.
- Demathieu G.R. 1984: Utilisation de lois de la mécanique pour l'estimation de la vitesse de locomotion des vertébrés tétrapodes du passé. *Geobios* 17.4, 439-446.
- Demathieu G.R. 1991: Prevalent Lebenssspuren on beaches of the Mediterranean coast of Languedoc, France, and the influence of the winds on their preservation. *AAPG (American Association of Petroleum Geologists) Bulletin* 75, p. 559.
- Dercourt J., Fourcade E., Cecca F., Azéma J., Enay R., Bassoulet J.-P. & Cottereau N. 1994: Palaeoenvironment of the Jurassic system in the Western and Central Tethys (Toarcian, Callovian, Kimmeridgian, Tithonian): an overview. *Geobios*, Mémoire Spécial 17, 625-644.
- Dercourt J., Gaetani M., Vrielynck B., Barrier E., Biju-Duval B., Brunet M.-F., Cadet J.P., Crasquin S. & Sandulescu M. (eds.) 2000: *Atlas Peri-Tethys, Palaeogeographical maps*. Commission of the Geological Map of the World, Paris, 268 p., 24 maps.
- Diedrich C. 2002b: Vertebrate track bed stratigraphy at new megatrack sites in the Upper Wellenkalk Member and *orbicularis* Member (Muschelkalk, Middle Triassic) in carbonate tidal flat environments of the western Germanic Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 183.3-4, 185-208.

- Difley R.L. & Ekdale A.A. 2002: Footprints of Utah's last dinosaurs: track beds in the Upper Cretaceous (Maastrichtian) North Horn Formation of the Wasatch Plateau, Central Utah. *Palaios* 17.4, 327-346.
- Dunham R.J. 1962: Classification of carbonate rocks according to depositional textures. In: Ham W.E. (ed.): *Classification of Carbonate Rocks*. AAPG (American Association of Petroleum Geologists) Memoir 1, 108-121.
- Dupraz C. 1999: *Paléontologie, paléoécologie et évolution des faciès récifaux de l'Oxfordien Moyen-Supérieur (Jura suisse et français)*. GeoFocus 2, 200 p.
- Enay R. 1980: Indices d'émergence et d'influences continentales dans l'Oxfordien supérieur-Kimméridgien inférieur en France. Interprétation paléogéographique et conséquences paléogéographiques. *Bulletin de la Société géologique de France* [7] 22.4, 581-590.
- Enay R., Contini D. & Boullier A. 1988: Le Séquanien-type de Franche-Comté (Oxfordien supérieur): datations et corrélations nouvelles, conséquences sur la paléogéographie et l'évolution du Jura et régions voisines. *Elogiae geologicae Helvetiae* 81.2, 295-363.
- Enay R., Tintant H. & Rioult M. 1971: Les zones du Jurassique en France: Kimméridgien. *Compte rendu sommaire des séances de la Société géologique de France* 6, 97-98.
- Falconnier A. 1931: *Étude géologique de la région du Col du Marchairuz*. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse [n.s.] 27, 31 p.
- Falkingham P.L. 2012: Acquisition of high resolution three-dimensional models using free, open-source, photogrammetric software. *Palaeontologia Electronica* 15.1.1T, 1-15.
- Falkingham P.L., Bates K.T. & Mannion P.D. 2012: Temporal and palaeoenvironmental distribution of manus- and pes-dominated sauropod trackways. *Journal of the Geological Society of London* 169.4, 365-370.
- Falkingham P.L. & Gatesy S.M. 2014: The birth of a dinosaur footprint: Subsurface 3D motion reconstruction and discrete element simulation reveal track ontogeny. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111.51, 18279-18284.
- Falkingham P.L. & Manning P.L. 2011: *The Transjurane Highway dinosaur tracksites and their significance and application for ichnological studies of dinosaur palaeobiology*. Rapport d'expertise. Paléontologie et Transjurane 34, 13 p.
- Falkingham P.L., Marty D. & Richter A. (eds.) 2016: *Dinosaur tracks-The next steps*. Indiana University Press, Bloomington, 413 p.
- Farlow J.O. 1992: Sauropod tracks and trackmakers: integrating the ichnological and skeletal records. *Zubia* 10, 89-138.
- Farlow J.O., Chapman R.E., Breithaupt B.H. & Matthews N. 2012: The scientific study of dinosaur footprints. In: Brett-Surman M.K., Holtz T.R. & Farlow J.O. (eds.): *The Complete Dinosaur*. Indiana University Press, Bloomington, 713-759.
- Farlow J.O., Pittman J.G. & Hawthorne J.M. 1989: *Brontopodus birdi*, Lower Cretaceous sauropod footprints from the U.S Gulf Coastal Plain. In: Gillette, D. D. & Lockley G.M. (eds.): *Dinosaur Tracks and Traces*. Cambridge University Press, Cambridge, 371-394.
- Folk R.L. 1962: Spectral subdivision of limestone types. In: Ham W.E. (ed.): *Classification of Carbonate Rocks*. AAPG (American Association of Petroleum Geologists) Memoir 1, 62-84.
- Fornós J.J., Bromley R.G., Clemmensen L.B. & Rodríguez-Perea A. 2002: Tracks and trackways of *Myotragus balearicus* Bate (Artiodactyla, Caprinae) in Pleistocene aeolianites from Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 180.4, 277-313.
- Fosso Menkem E. 2007: *Le Kimméridgien inférieur dans la région de Porrentruy (Jura suisse): Sédimentologie, stratigraphie séquentielle et cyclostratigraphie*. Université de Fribourg, 63 p.
- Foucault A., Raoult J.-F., Cecca F. & Platevoet B. 2014: *Dictionnaire de géologie*. Dunod, Paris, 369 p.
- Frakes L.A., Francis J.E. & Syktus J.I. (eds.) 1992: *Climate modes of the Phanerozoic*. Cambridge University Press, Cambridge, 274 p.
- Fretz R. 2011: *Messprotokolle zur Laserscankampagne vom 24.-25. Mai 2011 auf den Fundstellen Courtedoux-Béchat Bovais (cou 500) und Courtedoux-Sur Combe Ronde (cou 1500)*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 48, 40 p.
- Gaillard C. 2011: Ichnotaxinomie et notion d'ichnoespèce. *Comptes Rendus Palevol*, 10.2-3, 209-218.
- Gatesy S.M. 2003: Direct and indirect track features: what sediment did a dinosaur touch? *Ichnos* 10.2-4, 91-98.
- Gatesy S.M., Middleton K.M., Jenkins F.A. & Shubin N.H. 1999: Three-dimensional preservation of foot movements in Triassic theropod dinosaurs. *Nature* 399, 141-144.
- Gatesy S.M., Shubin N.H. & Jenkins F.A. 2005a: Anaglyph stereo imaging of dinosaur track morphology and microtopography. *Palaeontologia Electronica* 8.1.10A, 1-10.
- Gee C.T., Meyer C.A. & van Konijnenburg-van Cittert J.H.A. 2003: The first unequivocal sphenophytes from the Late Jurassic of northwestern Switzerland (late Oxfordian Vellerat Formation) – palaeobotany and implications for facies interpretation. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg* 241, 97-109.
- Gilette D.D. & Lockley M.G. (eds.) 1989: *Dinosaur Tracks and Traces*. Cambridge University Press, Cambridge, 454 p.
- Greppin J.-B. 1870: *Description géologique du Jura bernois et de quelques districts adjacents*. Matériaux pour la Carte géologique de la Suisse 8, 357 p.
- Gretz M. 2008: *Les calcaires blancs à coraux de la Formation de Reuchenette (Kimméridgien supérieur, Jura suisse): étude sédimentologique et biostratigraphique*. Université de Genève, 157 p.
- Gretz M., Ayer J. & Comment G. 2010: *Analyse microscopique de la Formation de Reuchenette (Kimméridgien): nouvelles données acquises dans le cadre de la construction de l'autoroute A16*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 37, 105 p.
- Gygi R.A. 1969: *Zur Stratigraphie der Oxford-Stufe (oberes Jura-System) der Nordschweiz und des süddeutschen Grenzgebietes*. Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz [N.F.] 136, 123 p.

- Gygi R.A. 1995: Datierung von Seichtwassersedimenten des Späten Jura in der Nordwestschweiz mit Ammoniten. *Eclogae geologicae Helvetiae* 88.1, 1-58.
- Gygi R.A. 2000a: *Integrated stratigraphy of the Oxfordian and Kimmeridgian (Late Jurassic) in northern Switzerland and adjacent southern Germany*. Memoirs of the Swiss Academy of Sciences 104, 152 p.
- Gygi R.A. 2000b: Annotated index of lithostratigraphic units currently used in the Upper Jurassic of northern Switzerland. *Eclogae geologicae Helvetiae* 93.1, 125-146.
- Gygi R.A., Coe A.L. & Vail P.R. 1998: Sequence stratigraphy of the Oxfordian and Kimmeridgian stages (Late Jurassic) in northern Switzerland. In: de Graciansky P.-C., Hardenbol J., Jacquin T. & Vail P.R. (eds.): *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication 60, 527-544.
- Hallam A. 1984: Continental humid and arid zones during the Jurassic and Cretaceous. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 47.3-4, 195-223.
- Hallam A. 1985: A review of Mesozoic climates. *Journal of the Geological Society of London* 142.3, 433-445.
- Hanusch T. & Vogel D. 2014: *Orthofotographie von Dinosaurierspuren auf der A16: Technischer Bericht*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 73, 41 p.
- Hardenbol J., Thierry J., Farley M.B., Jacquin T., de Graciansky P.C. & Vail P.R. 1998: *Mesozoic and Cenozoic sequence chronostratigraphic framework of European basins*. In: de Graciansky P.-C., Hardenbol J., Jacquin T. & Vail P.R. (eds.): *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication 60, 3-13 et 763-781.
- Hardie L.A. (ed.) 1977a: *Sedimentation on the modern carbonate tidal flats of Northwest Andros Island, Bahamas*. The Johns Hopkins University Studies in Geology 22, 202 p.
- Hardie L.A. 1977b: Algal structures in cemented crusts and their environmental significance. In: Hardie L.A. (ed.): *Sedimentation on the modern carbonate tidal flats of Northwest Andros Island, Bahamas*. The Johns Hopkins University Studies in Geology 22, 159-177.
- Hardie L.A. & Ginsburg R.N. 1977: Layering: the origin and environmental significance of lamination and thin bedding. In: Hardie L.A. (ed.): *Sedimentation on the modern carbonate tidal flats of northwest Andros Island, Bahamas*. The Johns Hopkins University Studies in Geology 22, 50-123.
- Haubold H. 1971: *Ichnia Amphibiorum et Reptiliorum fossilium*. Handbuch der Paläoherpetologie 18, 123 p.
- Henderson D.M. 2003: Footprints, trackways, and hip heights of bipedal dinosaurs – testing hip height predictions with computer models. *Ichnos* 10.2-4, 99-114.
- Henderson D.M. 2006a: Burly Gaits: Centers of mass, stability, and the trackways of sauropod dinosaurs. *Journal of Vertebrate Paleontology* 26.4, 907-921.
- Henderson D.M. 2006b: Simulated weathering of dinosaur tracks and the implications for their characterization. *Canadian Journal of Earth Sciences* 43.6, 691-704.
- Hillgärtner H. 1999: *The evolution of the French Jura platform during the Late Berriasi to Early Valanginian: controlling factors and timing*. *GeoFocus* 1, 203 p.
- Hitchcock E. 1836: Ornithichnology – Description of the Foot marks of birds, (Ornithichnites) on New Red Sandstone in Massachusetts. *American Journal of Science* 29, 307-340.
- Hitchcock E. 1848: An Attempt to discriminate and describe the Animals that made the Fossil Footmarks of the United States, and especially of New England. *Memoirs of the American Academy of Arts and Sciences* 3, 129-256.
- Hitchcock E. 1858: *Ichnology of New England. A report on the sandstone of the Connecticut Valley, especially its fossil footmarks*. White, Boston, 220 p.
- Hitchcock E. 1866: Supplement to the Ichnology of New England. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* 6, 85-92.
- Hostettler B. 1999: Paläontologische Überwachung und Grabung in Séprais und Glovelier. 78. Jahresversammlung der Schweizerischen Paläontologischen Gesellschaft 1999, Porrentruy, p. 7.
- von Huene F. 1922: Über einen Sauropoden im oberen Malm des Berner Jura. *Eclogae geologicae Helvetiae* 17.1, 80-94.
- von Huene F. 1914: Saurischia and Ornithischia. *Geological Magazine* VI.1.10, 444-445.
- von Huene F. 1920: Bemerkungen zur Systematik und Stammesgeschichte einiger Reptilien. *Zeitschrift für Induktive Abstammungs- und Vererbungslehre* 22.3, 209-212.
- von Huene F. 1926: Die Saurierfauna des Portlandkalkes von Solothurn. *Eclogae geologicae Helvetiae* 19.3, 584-603.
- Huerta P., Torcida Fernández-Baldor F., Farlow J.O. & Montero D. 2012: Exceptional preservation processes of 3D dinosaur footprint casts in Costalomo (Lower Cretaceous, Cameros Basin, Spain). *Terra Nova* 24.2, 136-141.
- Hug W.A. 2003: *Sequenzielle Faziesentwicklung der Karbonatplattform des Schweizer Jura im Späten Oxford und frühesten Kimmeridge*. *GeoFocus* 7, 156 p.
- Hunt A.P. & Lucas S.G. 2006: Tetrapod ichnofacies of the Cretaceous. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin* 35, 61-68.
- Hunt A.P. & Lucas S.G. 2007: Tetrapod ichnofacies: a new paradigm. *Ichnos* 14.1-2, 59-68.
- Hurum J.H., Milán J., Hammer Ø., Midtkandal I., Amundsen H. & Sæther B. 2006: Tracking polar dinosaurs – new finds from the Lower Cretaceous of Svalbard. *Norwegian Journal of Geology* 86, 397-402.
- Hutchinson J.R. 2010: *The significance of the Transjurane highway dinosaur tracksites for studies of dinosaur locomotor behaviour*. *Rapport d'expertise*. Paléontologie et Transjurane 23, 11 p.
- Ishigaki S. & Fujisaki T. 1989: Three dimensional representation of *Eubrontes* by the method of Moiré topography. In: Gilette D.D. & Lockley M.G. (eds.): *Dinosaur Tracks and Traces*. Cambridge University Press, Cambridge, 421-425.

- Jackson S.J., Whyte M.A. & Romano M. 2009: Laboratory-controlled simulations of dinosaur footprints in sand: a key to understanding vertebrate track formation and preservation. *Palaios* 24.4, 222-238.
- Jackson S.J., Whyte M.A. & Romano M. 2010: Range of experimental dinosaur (*Hypsilophodon foxii*) footprints due to variation in sand consistency: how wet was the track? *Ichnos* 17.3, 197-214.
- Jank M., Meyer C.A. & Wetzel A. 2006a: Late Oxfordian to Late Kimmeridgian carbonate deposits of NW Switzerland (Swiss Jura): Stratigraphical and palaeogeographical implications in the transition area between the Paris Basin and the Tethys. *Sedimentary Geology* 186.3-4, 237-263.
- Jank M., Wetzel A. & Meyer C.A. 2006b: A calibrated composite section for the Late Jurassic Reuchenette Formation in northwestern Switzerland (?Oxfordian, Kimmeridgian *sensu gallico*, Ajoie-Region). *Eclogae geologicae Helvetiae* 99.2, 175-191.
- Jank M., Wetzel A. & Meyer C.A. 2006c: Late Jurassic sea-level fluctuations in NW Switzerland (Late Oxfordian to Late Kimmeridgian): closing the gap between the Boreal and Tethyan realm in Western Europe. *Facies* 52.4, 487-519.
- Jones T.R. 1862: Tracks, trails and surface markings. *Geologist* 5, 128-139.
- Keller C. 2006: *A high resolution interpretation of Kimmeridgian depositional environments, omission surfaces and sequences (Courtedoux – Canton Jura – Switzerland)*. Université de Fribourg, 90 p.
- van Konijnenburg-van Cittert J.H.A. & Meyer C.A. 1996: Plant remains from the Vellerat Formation (Oxfordian) of the Swiss Jura Mountains. *Eclogae geologicae Helvetiae* 89.3, 1117-1136.
- Landry P. 2013: L'Ain, terre de dinosaures. *Le Bugey* 100, 53-72.
- Landry P. & Orbette D. 2012: Un megatracksite dans le Jurassique terminal du Jura. *Quatrième Symposium Georges Cuvier 2012*, Montbéliard (F).
- Laporte L.F. & Behrensmeyer A.K. 1980: Tracks and substrate reworking by terrestrial vertebrates in Quaternary sediments of Kenya. *Journal of Sedimentary Petrology* 50.4, 1337-1346.
- de Lapparent A.-F. 1943: *Les Dinosauriens jurassiques de Damparis (Jura)*. Mémoires de la Société géologique de France [n.s.] 47, 21 p.
- de Lapparent A.-F. 1962: Footprints of dinosaur in the Lower Cretaceous of Vestspitsbergen-Svalbard. *Norsk Polarinstittut Årbok* 1960, 14-21.
- Le Loeuff J., Gourrat C., Landry P., Hautier L., Liard R., Souillat C., Buffetaut E. & Enay R. 2006: A Late Jurassic sauropod tracksite from Southern Jura (France). *Comptes Rendus Palevol* 5.5, 705-709.
- Leonardi G. (ed.) 1987: *Glossary and Manual of Tetrapod Footprint Palaeoichnology*. Departamento nacional da produção mineral, Brasília, 75 p.
- Leonardi G. 1987: Discussion of the terms and methods. In: Leonardi G. (ed.) 1987: *Glossary and Manual of Tetrapod Footprint Palaeoichnology*. Departamento nacional da produção mineral, Brasília, 43-51.
- Lessertisseur J. 1955: *Traces fossiles d'activité animale et leur signification paléobiologique*. Mémoires de la Société géologique de France [n.s.] 74, 150 p.
- Lockley M.G. 1986: The paleobiological and paleoenvironmental importance of dinosaur footprints. *Palaios* 1.1, 37-47.
- Lockley M.G. 1987: Dinosaur trackways and their importance in paleoenvironmental reconstruction. In: Czerkas S. & Olson E.C. (eds.): *Dinosaurs: Past and Present*. Natural History Museum, Los Angeles, 81-95.
- Lockley M.G. 1991: *Tracking Dinosaurs: A New Look at an Ancient World*. Cambridge University Press, Cambridge, 238 p.
- Lockley M.G. 1991a: The dinosaur footprint renaissance. *Modern Geology* 16, 139-160.
- Lockley M.G. 1992: Vertebrate tracks and sequence stratigraphy: an unusual combination of disciplines or a natural marriage? In: Warne J.E., Weimer P., Sonnenberg S.A., Basse R. & Posamentier H.W. (eds.): *Applied sequence stratigraphy—a symposium*. Colorado School of Mines, Golden, 25-27.
- Lockley M.G. 1998: Philosophical perspectives on theropod track morphology: Blending qualities and quantities in the science of ichnology. *Gaia* 15, 279-300.
- Lockley M.G. & Conrad K. 1989: The paleoenvironmental context, preservation and paleoecological significance of dinosaur tracksites in the western USA. In: Gillette D.D. & Lockley M.G. (eds.): *Dinosaur Tracks and Traces*. Cambridge University Press, Cambridge, 121-134.
- Lockley M.G., Farlow J.O. & Meyer C.A. 1994: *Brontopodus* and *Parabrontopodus* ichnogen. nov. and the significance of wide- and narrow-gauge sauropod trackways. *Gaia* 10, 135-145.
- Lockley M.G. & Gillette D.D. 1987: Dinosaur tracks symposium signals a renaissance in vertebrate ichnology. *Paleobiology* 13.2, 246-252.
- Lockley M.G. & Gillette D.D. 1989: Dinosaur tracks and traces: an overview. In: Lockley M.G. & Gillette D. D. (eds.): *Dinosaur Tracks and Traces*. Cambridge University Press, Cambridge, 3-10.
- Lockley M.G. & Hunt A.P. 1995: *Dinosaur tracks and other fossil footprints of the Western United States*. Columbia University Press, New York, 338 p.
- Lockley M.G., Hunt A.P., Holbrook J., Matsukawa M. & Meyer C.A. 1992a: The dinosaur freeway: a preliminary report on the Cretaceous megatracksite, Dakota Group, Rocky Mountain Front Range, and High Plains, Colorado, Oklahoma and New Mexiko. In: Flores R.M. (ed.): *Mesozoic of the Western Interior. SEPM (Society for Sedimentary Geology) 1992 Theme Meeting*, Fort Collins (CO), 39-54.
- Lockley M.G., Hunt A.P. & Meyer C.A. 1994: Vertebrate tracks and the ichnofacies concept: implications for paleoecology and palichnostratigraphy. In: Donovan S.K. (ed.): *The Paleobiology of Trace Fossils*. Wiley & Sons, Chichester, 241-268.
- Lockley M.G. & Meyer C.A. 1997: Sacred ground: walking in the footsteps of our ancestors. In: Huh M., Yang S.S.Y., Lockley M.G. & Lee Y.N. (eds.): *Proceedings of the International Dinosaur Symposium for the Uhangri Dinosaur Center and Theme Park*. Chonnam National University, Gwangju, 211-220.
- Lockley M.G. & Meyer C.A. 2000: *Dinosaur tracks and other fossil footprints of Europe*. Columbia University Press, New York, 323 p.

- Lockley M.G., Schulp A.S., Meyer C.A., Leonardi G. & Kerumba Mamami D. 2002: Titanosaurid trackways from the Upper Cretaceous of Bolivia: evidence for large manus, wide-gauge locomotion and gregarious behaviour. *Cretaceous Research* 23.3, 383-400.
- Logan B.W., Davies G.R., Read J.F. & Cebulski D.E. (eds.) 1970: *Carbonate Sedimentation and Environments, Shark Bay, Western Australia*. AAPG (American Association of Petroleum Geologists) Memoir 13, 223 p.
- McKeever P.J. & Haubold H. 1996: Reclassification of vertebrate trackways from the Permian of Scotland and related forms from Arizona and Germany. *Journal of Paleontology* 70.6, 1011-1022.
- Manning P.L. 2004: A new approach to the analysis and interpretation of tracks: examples from the Dinosauria. In: McIlroy D. (ed.): *The application of ichnology to palaeoenvironmental and stratigraphical analysis*, Geological Society of London, Special Publications 228, 93-123.
- Marsh O.C., 1884: The classification and affinities of dinosaurian reptiles. *Nature* 31.786, 68-69.
- Marty D. 2008: *Sedimentology, taphonomy, and ichnology of Late Jurassic dinosaur tracks from the Jura carbonate platform (Chevenez-Combe Ronde tracksite, NW Switzerland): insights into the tidal-flat palaeoenvironment and dinosaur diversity, locomotion, and palaeoecology*. GeoFocus 21, 278 p.
- Marty D., Ayer J., Becker D., Berger J.-P., Billon-Bruyat J.-P., Braillard L., Hug W.A. & Meyer C.A. 2007: Late Jurassic dinosaur tracksites of the Transjurane highway (Canton Jura, NW Switzerland): overview and measures for their protection and valorisation. *Bulletin für angewandte Geologie* 12.1, 75-89.
- Marty D., Belvedere M., Meyer C.A., Mietto P., Paratte G., Lovis C. & Thüring B. 2010: Comparative analysis of Late Jurassic sauropod trackways from the Jura Mountains (NW Switzerland) and the central High Atlas Mountains (Morocco): implications for sauropod ichnotaxonomy. *Historical Biology* 22.1-3, 109-133.
- Marty D. & Billon-Bruyat J.-P. 2004: A new reptilian fauna from the Late Jurassic of Western Europe (Kimmeridgian, Switzerland). *Journal of Vertebrate Paleontology* 24.3 Supplement, p. A90.
- Marty D., Cavin L., Hug W.A., Jordan P., Lockley M.G. & Meyer C.A. 2004: The protection, conservation and sustainable use of the Courtedoux dinosaur tracksite, Canton Jura, Switzerland. *Revue de Paléobiologie*, vol. spéc. 9, 39-49.
- Marty D., Cavin L., Hug W.A., Meyer C.A., Lockley M.G. & Iberg A. 2003: Preliminary report on the Courtedoux dinosaur tracksite from the Kimmeridgian of Switzerland. *Ichnos* 10.2-4, 209-219.
- Marty D., Meyer C.A. & Billon-Bruyat J.-P. 2006b: Sauropod trackway patterns expression of special behaviour related to substrate consistency? An example from the Late Jurassic of northwestern Switzerland. *Hantkeniana* 5, 38-41.
- Marty D., Paratte G., Lovis C., Jacquemet M. & Meyer C.A. 2010: Extraordinary sauropod trackways from the Late Jurassic Béchat Bovais tracksite (Canton Jura, NW Switzerland): implications for sauropod locomotor styles, *8th Swiss Geoscience Meeting 2010*, Fribourg.
- Marty D. & Strasser A. 2005: Sedimentology and palaeoenvironment of dinosaur-track bearing laminites (Late Kimmeridgian, Canton Jura): first results. *13th Meeting of Swiss Sedimentologists 2005*, Fribourg, 36-37.
- Marty D., Strasser A. & Meyer C.A. 2009: Formation and taphonomy of human footprints in microbial mats of present-day tidal-flat environments: implications for the study of fossil footprints. *Ichnos* 16.1-2, 127-142.
- Marty D., Belvedere M., Razzolini N.L., Lockley M.G., Paratte G., Cattin M., Lovis C. & Meyer C.A. 2017: The tracks of giant theropods (*Jurabrontes curtedulensis* ichnogen. & ichnosp. nov.) from the Late Jurassic of NW Switzerland: palaeoecological & palaeogeographical implications. *Historical Biology*, 29 p.
- Matthews N.A. & Breithaupt B.H. 2001: Close-range photogrammetric experiments at Dinosaur Ridge. *The Mountain Geologist* 38.3, 147-153.
- Matthews N.A., Breithaupt B.H., Noble T., Titus A. & Smith J. 2005: A geo-spatial look at the morphological variation of tracks at the Twentymile Wash dinosaur tracksite, Grand Staircase-Escalante National Monument, Utah. *Journal of Vertebrate Paleontology* 25.3 Supplement, p. 90A.
- Matthews N.A., Noble T.A. & Breithaupt B.H. 2006: The application of photogrammetry, remote sensing and geographic information systems (GIS) to fossil resource management. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin* 34, 119-131.
- Matthews N.A., Noble T., Titus A., Foster J.R., Smith J.A., Breithaupt B.H. & Kett D. 2002: Tracking dinosaurs using low-altitude aerial photography at the Twentymile Wash Dinosaur Tracksite, Grand Staircase-Escalante National Monument, Utah. *54th Annual Meeting of the Geological Society of America 2002*, Cedar City (UT), p. 6.
- Mazin J.-M. & Hantzpergue P. 2006: The first sauropod megatracksites from France: the Loulle quarry (Late Oxfordian, Jura, France). *54th Symposium of Vertebrate Palaeontology and Comparative Anatomy & 15th Symposium of Palaeontological Preparation and Conservation 2006*, Paris, p. 21.
- Mazin J.-M. & Hantzpergue P. 2010: Les traces de dinosaures des sites jurassiques français (Coisia, Loulle, Plagne). In: Billon-Bruyat J.-P. (coord.): colloque scientifique *La frontière franco-suisse: un petit pas pour les dinosaures*, 29-30 octobre. Paléojura, Porrentruy, 15-16.
- Mazin J.-M. & Hantzpergue P. 2012: Late Jurassic dinosaur tracksites of the French Jura mountains. *Quatrième Symposium Georges Cuvier 2012*, Montbéliard (F).
- Meyer C.A. 1990: Sauropod tracks from the Upper Jurassic Reuchenette Formation (Kimmeridgian; Lommiswil, Kt. Solothurn) of northern Switzerland. *Eclogae geologicae Helvetiae* 83.2, 389-397.
- Meyer C.A. 1993: A sauropod dinosaur megatracksite from the Late Jurassic of northern Switzerland. *Ichnos* 3.1, 29-38.
- Meyer C.A. 1994: Depositional environment and paleoecology of the Solothurn Turtle limestone (Kimmeridgian, Northern Switzerland). *Geobios* 27, Supplement 1, 227-236.
- Meyer C.A. & Lockley M.G. 1996: The Late Jurassic continental fossil record of Northern Switzerland – evidence and implications. In: Morales M. (ed.): *The continental Jurassic*. Museum of Northern Arizona, Bulletin 60, 421-426.
- Meyer C.A., Lockley M.G., Robinson J.W. & dos Santos V.F. 1994: A comparison of well-preserved sauropod tracks from the Late Jurassic of Portugal and the Western United States: evidence and implications. *Gaia* 10, 57-64.

- Meyer C.A. & Thüring B. 2003a: Dinosaurs of Switzerland. *Comptes Rendus Palevol* 2.1, 103-117.
- Meyer C.A. & Thüring B. 2006: A marriage between geotechnique and paleontology: three dimensional visualization of a geological monument for scientific exploration and geotechnical conservation (Cal Orcko, Sucre, Bolivia). *4th Swiss Geoscience Meeting 2006*, Bern, 133-134.
- Meyer C.A., Thüring B. & Wetzel A. 2006: The hitch-hikers guide to the Late Jurassic – basement structures provide clues to dinosaur migration routes. *Hantkeniana* 5, p. 96.
- Milà J. 2006: Variations in the morphology of emu (*Dromaius novaehollandiae*) tracks reflecting differences in walking pattern and substrate consistency: ichnotaxonomic implications. *Palaeontology* 49.2, 405-420.
- Milà J. & Bromley R.G. 2006: True tracks, undertracks and eroded tracks, experimental work with tetrapod tracks in laboratory and field. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 231.3-4, 253-264.
- Milà J. & Bromley R.G. 2008: The impact of sediment consistency on track and undertrack morphology: experiments with emu tracks in layered cement. *Ichnos* 15.1, 19-27.
- Milà J., Christiansen P. & Mateus O. 2005: A three-dimensionally preserved sauropod manus impression from the Upper Jurassic of Portugal: Implications for sauropod manus shape and locomotor mechanics. *Kaupia – Darmstädter Beiträge zur Naturgeschichte* 14, 47-52.
- Milà J., Clemmensen L.B. & Bonde N. 2004: Vertical sections through dinosaur tracks (Late Triassic lake deposits, East Greenland) – undertracks and other subsurface structures revealed. *Lethaia* 37.3, 285-296.
- Milanković M. 1941: *Kanon der Erdbeleuchtung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Royal Serbian Academy, Special Publications 132, Section of Mathematical and Natural Sciences 33, 633 p.
- Miserez C. 2012: *Recherches et réflexions inhérentes à la conception d'un support pour des prélèvements de couches géologiques en vue de leur étude et de leur exposition*. Haute école de conservation-restauration ARC Neuchâtel, 206 p.
- Miserez C., Rochat M., Paratte G. & Marty D. 2013: Development and production of a support for dinosaur track-bearing slabs recovered from Highway A16 excavations (NW Switzerland). *6th Annual Fossil Preparation & Collections Symposium 2013*, Drumheller (CDN).
- Mojon P.-O. 2002: *Les formations mésozoïques à Charophytes (Jurassique moyen-Crétacé inférieur) de la marge téthysienne nord-occidentale (SE de la France, Suisse occidentale, NE de l'Espagne)*. Sédimetntologie, micropaléontologie, biostratigraphie. Géologie Alpine, Mémoire 41, 251 p.
- Monty C.L.V. 1972: Recent algal stromatolitic deposits, Andros Island, Bahamas. Preliminary report. *International Journal of Earth Sciences* 61.2, 742-783.
- Moore G.T., Hayashida D.N., Ross C.A. & Jacobson S.R. 1992: Paleo-climate of the Kimmeridgian/Tithonian (Late Jurassic) world: I. Results using a general circulation model. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 93.1-2, 113-150.
- Moore G.T. & Ross C.A. 1994: Kimmeridgian-Tithonian (Late Jurassic) dinosaur and ammonoid paleoecology from a paleoclimate simulation. In: Embry C.A., Beauchamp B. & Glass D.J. (eds.): *Pangea: global environments and resources*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 17, 345-361.
- Moratalla J.J., Sanz J.L. & Jimenez S. 1988: Multivariate analysis on Lower Cretaceous dinosaur footprints: Discrimination between ornithopods and theropods. *Geobios* 21.4, 395-408.
- Mossman D.J. & Sarjeant W.A.S. 1997: Fossile Fährten – den Dinosauriern auf der Spur. *Spektrum der Wissenschaft, Digest* 5, 48-59.
- Mouchet P. 1995: *Le Kimmeridgien du Jura central. Microfaciès, minéralogie et interprétation séquentielle*. Université de Neuchâtel, 204 p.
- Nadon G.C. 2001: The impact of sedimentology on vertebrate track studies. In: Tanke D.H. & Carpenter K. (eds.): *Mesozoic Vertebrate Life*. Indiana University Press, Bloomington & Indianapolis, 395-407.
- Oertli H.J. & Ziegler M. 1958: Présence d'un Séquanien lacustre dans la région de Pontarlier. *Eclogae geologicae Helvetiae* 51.2, 385-390.
- Padian K. & Olsen P.E. 1984: Footprints of the Komodo monitor and the trackways of fossil reptiles. *Copeia* 1984.3, 662-671.
- Padian K. & Olsen P.E. 1989: Ratite footprints and the stance and gait of Mesozoic theropods. In: Gillette D.D. & Lockley M. (eds.): *Dinosaur Tracks and Traces*. Cambridge University Press, Cambridge, 231-241.
- Paratte G. 2009: Sur les routes de la Paléontologie A16: le Jura, terre de surprises. *Strasse und Verkehr / Route et trafic* 1-2, 20-26.
- Paratte G. 2012: Prochaine sortie A16: province des dinosaures. *Archéologie suisse* 35.4, 4-15.
- Paratte G., Marty D., Lovis C., Jacquemet M., Hug W.A., Iberg A., Oriet A., Denier C. & Mihajlovic D. 2009: Methodology of systematic excavation and documentation of dinosaur tracksites along the Transjurane highway (Canton Jura, NW Switzerland). *Actes 2009bis de la Société jurassienne d'Émulation*, 67-68.
- Peabody F.E. 1948: Reptile and amphibian trackways from the Lower Triassic Moenkopi Formation of Arizona and Utah. *University of California, Bulletin of the Department of Geological Sciences* 27.8, 295-467.
- Peabody F.E. 1959: Trackways of living and fossil salamanders. *University of California Publications in Zoology* 63.1, 1-72.
- Pemberton S.G. 2010: History of ichnology: the Reverend William Buckland (1784-1856) and the fugitive poets. *Ichnos* 17.4, 246-263.
- Pfister A.-L. & Miserez C. 2014: *Préparation fine des traces de dinosaures. Rapports de travail n°s 216, 234, 239 et 240*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 70, 42 p.
- Philippe M. 1995: Bois fossile du Jurassique de Franche-Comté (N-E France). *Palaeontographica B* 236.1-3, 45-103.
- Philippe M., Billon-Bruyat J.-P., Garcia-Ramos J.C., Bocat L., Gomez B. & Piñuela L. 2010: New occurrences of the wood *Protocupressinoxylon purbeckensis* Francis: implications for terrestrial biomes in southwestern Europe at the Jurassic/Cretaceous Boundary. *Palaeontology* 53.1, 201-214.

- Phillips P.L., Ludvigson G.A., Joeckel R.M., González L.A., Brenner R.L. & Witzke B.J. 2007: Sequence stratigraphic controls on synsedimentary cementation and preservation of dinosaur tracks: Example from the lower Cretaceous, (Upper Albian) Dakota Formation, Southeastern Nebraska, U.S.A. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 246.2-4, 367-389.
- Platt B.F. & Hasiotis S.T. 2006: Newly discovered sauropod dinosaur tracks with skin and foot-pad impressions from the Upper Jurassic Morrison Formation, Bighorn Basin, Wyoming, U.S.A. *Palaios* 21.3, 249-261.
- Pulfer J. 2012: *Laserscanning von Dinosaurier-Spurenplatten auf der Autobahn A16, Datenaufbearbeitung und Abgabe*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 66, 54 p.
- Purser B.H. 1973: *The Persian Gulf: Holocene carbonate sedimentation and diagenesis in a shallow epicontinental sea*. Springer, Berlin, 471 p.
- Rainforth E. & Manzella M. 2007: Estimating speeds of dinosaurs from trackways: a reevaluation of assumptions. In: Rainforth E. (ed.): *Contributions to the Paleontology of New Jersey (II)*. Geological Association of New Jersey, XXIV Annual Meeting 2007, East Stroudsburg (PA), 41-48.
- Rameil N. 2005: *Carbonate sedimentology, sequence stratigraphy, and cyclostratigraphy of the Tithonian in the Swiss and French Jura Mountains*. GeoFocus 13, 246 p.
- Rankey E.C., Enos P., Steffen K. & Duke D. 2004: Lack of impact of hurricane Michelle on tidal flats, Andros Island, Bahamas: integrated remote sensing and field observations. *Journal of Sedimentary Research* 74.5, 654-661.
- Razzolini N.L., Vila B., Castanera D., Falkingham P.L., Barco J.L., Canudo J.I., Manning P.L. & Galobart À. 2014: Intra-trackway morphological variations due to substrate consistency: the El Frontal dinosaur tracksite (Lower Cretaceous, Spain). *PLoS ONE* 9:e93708.
- Razzolini N.L., Belvedere M., Marty D., Paratte G., Lovis C., Cattin M. & Meyer C.A. 2017: *Megalosauripus transjuranicus* ichnosp. nov. A new Late Jurassic theropod ichnotaxon from NW Switzerland and implications for tridactyl dinosaur ichnology and ichnotaxonomy. *PLoS ONE* 12.7: e0180289, 42 p.
- Remane J. 1991: The Jurassic-Cretaceous boundary: problems of definition and procedure. *Cretaceous Research* 12.5, 447-453.
- Roehl P.O. 1967: Stony Mountain (Ordovician) and Interlake (Silurian) facies analogs of recent low-energy marine and subaerial carbonates, Bahamas. *AAPG (American Association of Petroleum Geologists) Bulletin* 51.10, 1979-2032.
- Romano M. & Whyte M.A. 2003: Jurassic dinosaur tracks and trackways of the Cleveland Basin, Yorkshire: preservation, diversity and distribution. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society* 54.3, 185-215.
- Romano M. & Whyte M.A. 2012: Information on the foot morphology, pedal skin texture and limb dynamics of sauropods: evidence from the ichnological record of the Middle Jurassic of the Cleveland Basin, Yorkshire, UK. *Zubía* 30, 45-92.
- Romano M., Whyte M.A. & Jackson S.J. 2007: Trackway ratio: a new look at trackway gauge in the analysis of quadrupedal dinosaur trackways and its implications for ichnotaxonomy. *Ichnos* 14.3-4, 257-270.
- Romilio A. & Salisbury S.W. 2011: A reassessment of large theropod dinosaur tracks from the mid-Cretaceous (late Albian–Cenomanian) Winton Formation of Lark Quarry, central-western Queensland, Australia: A case for mistaken identity. *Cretaceous Research* 32.2, 135-142.
- Ross C.A., Moore G.T. & Hayashida D.N. 1992: Late Jurassic paleoclimate simulation; paleoecological implications for ammonoid provinciality. *Palaios* 7.5, 487-507.
- Sandoz M. 2009: *Les Calcaires à coraux de la Formation de la Reuchenette (Kimméridgien supérieur) dans la région de Courtedoux (Ajoie, Jura)*. Université de Genève, 178 p.
- Sandoz M. 2010: *VTT007 et TCH008: Observation des lames minces*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 40, 47 p.
- Sarjeant W.A.S. 1989: "Ten paleoichnological commandments": a standardized procedure for the description of fossil vertebrate footprints. In: Gillette D.D. & Lockley M.G. (eds.): *Dinosaur tracks and traces*. Cambridge University Press, Cambridge, 369-370.
- Schudack M., Schudack U. & Marty D. 2013: Kimmeridgian (Upper Jurassic) ostracods from the Transjurane Highway (Canton Jura, NW Switzerland): taxonomy, stratigraphy and palaeoecology. *Il Naturalista siciliano* IV.37.1, 353-355.
- Schudack U., Schudack M., Marty D. & Comment G. 2013: Kimmeridgian (Late Jurassic) ostracods from Highway A16 (NW Switzerland): taxonomy, stratigraphy, ecology, and biogeography. *Swiss Journal of Geosciences* 106.2, 371-395.
- Scrivner P.J. & Bottjer D.J. 1986: Neogen avian and mammalian tracks from Death Valley National Monument, California: Their context, classification and preservation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 57.2-4, 285-331.
- Schwarz D., Wings O. & Meyer C.A. 2007a: Super sizing the giants: first cartilage preservation at a sauropod dinosaur limb joint. *Journal of the Geological Society of London* 164.1, 61-65.
- Scott J.J., Renaut R.W., Owen R.B. & Sarjeant W.A.S. 2007: Biogenic activity, trace formation, and trace taphonomy in the marginal sediments of saline, alkaline Lake Bogoria, Kenya Rift Valley. In: Bromley R.G., Buatois L.A., Mángano G., Genise J.F. & Melchor R.N. (eds.): *Sediment-Organism Interactions: Multifaceted Ichnology*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication 88, 311-332.
- Sellers W.I., Manning P. L., Lyson T., Stevens K. & Margetts L. 2009: Virtual palaeontology: gait reconstruction of extinct vertebrates using high performance computing. *Palaeontologia Electronica* 12.3.11A, 1-26.
- Senter P. 2007: A new look at the phylogeny of Coelurosauria (Dinosauria: Theropoda). *Journal of Systematic Paleontology* 5.4, 429-463.
- Smith R.M.H. 1993: Sedimentology and ichnology of floodplain paleosurfaces in the Beaufort Group (Late Permian), Karoo Sequence, South Africa. *Palaios* 8.4, 339-357.
- Smith A.G., Smith D.G. & Funnell B.M. 1994: *Atlas of Mesozoic and Cenozoic coastlines*. Cambridge University Press, Cambridge, 99 p.
- Staudacher F., Meyer C.A., Hug W.A., Huber F. & Denier C. 2003: Sensationelle Dinosaurier-Fussspuren mit 3D-Lasermass. *Mensuration, Photogrammétrie, Génie rural* 2003.1, 36-38.

- Stevens K.A. 2010: *Regarding the extraordinary dinosaur tracksites of the Transjurane highway (Canton Jura, Switzerland)*. Rapport d'expertise. Paléontologie et Transjurane 25, 13 p.
- Stevens K.A. & Ernst S. 2012: *A16 trackway analysis: final report for the period 02/2012 - 11/2012*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 54, 15 p.
- Stevens K.A. & Ernst S. 2013: *Statistical analyses of highway A16 dinosaur trackways: final report 2013*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 67, 9 p.
- Stevens K.A. & Ernst S. 2014: *Statistical analyses of highway A16 dinosaur trackways: final report 2014*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 71, 26 p.
- Stevens K.A. & Ernst S. 2015: *Statistical analyses of highway A16 dinosaur trackways: final report 2015*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 77, 51 p.
- Stevens K.A., Ernst S. & Marty D. 2016: Uncertainty and ambiguity in the interpretation of sauropod trackways. In: Falkingham P.L., Marty D. & Richter A. (eds.): *Dinosaur tracks – The next steps*. Indiana University Press, Bloomington, 226-243
- Stevens K.A. & Ernst S. 2017: *Statistical analyses of highway A16 dinosaur trackways: final report*. Paléontologie A16, Étude intermédiaire 81, 5895 p.
- Strasser A. 2007: Astronomical time scale for the Middle Oxfordian to Late Kimmeridgian in the Swiss and French Jura Mountains. *Swiss Journal of Geosciences* 100.3, 407-429.
- Thalmann H.K. 1966: Zur Stratigraphie des oberen Malm im südlichen Berner und Solothurner Jura. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft des Kantons Solothurn* 22, 1-126.
- Thierry J. et al. 2000: Early Kimmeridgian (146-144 Ma). In: Dercourt J., Gaetani M. et al. (eds.): *Atlas Peri-Tethys, Palaeogeographical maps*. Commission of the Geological Map of the World, Paris, map 10.
- Thulborn R.A. 1989: The gaits of dinosaurs. In: Gillette D.D. & Lockley M.G. (eds.): *Dinosaur Tracks and Traces*. Cambridge University Press, Cambridge, 39-50.
- Thulborn R.A. 2013: Lark Quarry revisited: a critique of methods used to identify a large dinosaurian track-maker in the Winton Formation (Albian–Cenomanian), western Queensland, Australia. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology* 37.3, 312-330.
- Thulborn R.A. & Wade M. 1984: Dinosaur trackways in the Winton Formation (mid-Cretaceous) of Queensland. *Memoirs of the Queensland Museum* 21, 413-517.
- Thulborn R.A. & Wade M. 1989: A footprint as a history of movement. In: Gillette D.D. & Lockley M.G. (eds.): *Dinosaur Tracks and Traces*. Cambridge University Press, Cambridge, 51-56.
- Thulborn T. 1990: *Dinosaur Tracks*. Chapman & Hall, London, 410 p.
- Thulborn T. 2012: Impact of sauropod dinosaurs on lagoonal substrates in the Broome Sandstone (Lower Cretaceous), Western Australia. *PLoS ONE* 7:e36208.
- Thüring B., Meyer C.A., Bucher S., Graf K., Heim G. & Linsiger S. 2007: How to scan a whole mountain – a new method for the scientific assessment of dinosaur tracksites. *5th annual meeting of the European Association of Vertebrate Palaeontologists 2007*, Carcassonne (F), p. 62.
- Thurmann J. 1832: Essai sur les soulèvements jurassiques du Porrentruy. *Mémoires de la Société d'histoire naturelle de Strasbourg* 1.2, 1-84.
- Thurmann J. & Etallon A. 1861-1864: *Letheia bruntrutana ou Études paléontologiques et stratigraphiques sur le Jura bernois et en particulier les environs de Porrentruy. Nouveaux mémoires de la Société helvétique des sciences naturelles* 18-20, 1-500.
- Tresch J. 2007: *History of a Middle Berriasian transgression (Switzerland, France, and southern England)*. GeoFocus 16, 271 p.
- Tschudin P. 2001: *Teil I: Shell morphology, shell texture and species discrimination of Caribbean tucetona (Bivalvia, Glycymeridae) – Teil II: Geländeearbeiten im Schweizer Jura: Profilaufnahme Glovelier (JU) Kartierung Hautes Roches (BE)*. Université de Berne, 119 p.
- Tucker M.E. & Burchette T.P. 1977: Triassic dinosaur footprints from south Wales: Their context and preservation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 22.3, 195-208.
- Uchman A. & Pervesler P. 2006: Surface Lebensspuren produced by amphipods and isopods (crustaceans) from the Isonzo delta tidal flat, Italy. *Palaios* 21.4, 384-390.
- Waite R., Wetzel A., Meyer C.A. & Strasser A. 2008: The paleoecological significance of nerineoid mass accumulations from the Kimmeridgian of the Swiss Jura Mountains. *Palaios* 23.8, 548-558.
- Waite R. 2010: *The palaeoecology of high-spined gastropods and the lost palaeosols: depositional reconstructions on a shallow carbonate platform (Late Kimmeridgian, Swiss Jura Mountains)*. GeoFocus 23, 149 p.
- Waite R., Marty D., Strasser A. & Wetzel A. 2013: The lost paleosols: Masked evidence for emergence and soil formation on the Kimmeridgian Jura platform (NW Switzerland). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 376, 73-90.
- Weissert H. & Mohr H. 1996: Late Jurassic climate and its impact on carbon cycling. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 122.1-4, 27-43.
- Weishampel D.B., Dodson P. & Osmólska H. (eds.) 2004: *The Dinosauria*. University of California Press, Berkeley, Los Angeles & London, 861 p.
- Widdowson M. (ed.) 1997: *Palaeosurfaces: recognition, reconstruction and palaeoenvironmental interpretation*. Geological Society of London, Special Publications 120, 330 p.
- Wilson J.A. & Sereno P.C. 1998: *Early evolution and higher-level phylogeny of sauropod dinosaurs*. *Journal of Vertebrate Paleontology, Memoir* 5, 79 p.
- Wright J.L. 2005: Steps in understanding sauropod biology: The importance of sauropod tracks. In: Curry Rogers K.A. & Wilson J.A. (eds.): *The Sauropods: Evolution and Paleobiology*. University of California Press, Berkeley & Los Angeles, 252-284.
- Ziegler B. 1964: Das untere Kimmeridgium in Europa. *Comptes Rendus et Mémoires de l'Institut grand-ducal, section des Sciences naturelles, physiques et mathématiques*, 345-354.
- Ziegler P.A. 1956: Zur Stratigraphie des Séquanien im zentralen Schweizer Jura. *Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz [N.F.]* 102, 37-98.

Références non citées

- Allenbach R.P. 2002: The ups and downs of «Tectonic Quiescence»: recognizing differential subsidence in the epicontinental sea of the Oxfordian in the Swiss Jura Mountains. *Sedimentary Geology* 150.3-4, 323-342.
- Aubert D. 1943: *Monographie géologique de la Vallée de Joux (Jura vaudois)*. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse [n.s.] 78, 134 p.
- Bläsi H. 1980: *Die Ablagerungsverhältnisse im «Portlandien» des schweizerischen und französischen Juras*. Université de Berne, 151 p.
- Bourquin Ph. 1946: 114 Biaufond, 115 Les Bois, 116 La Ferrière, 117 St-Imier: notice explicative (feuille 15 de l'Atlas). Atlas géologique de la Suisse 1:25000, Commission géologique de la Société helvétique des sciences naturelles, Berne, 56 p.
- Burkhalter R. & Heckendorf W. 2009: Das Stratigraphische Komitee der Schweiz (SKS). *Swiss Bulletin für angewandte Geologie* 14.1-2, 159-162.
- Cariou E. & Hantzpergue P. (coord.) 1997: *Biostratigraphie du Jurassique ouest-européen et méditerranéen: zonations parallèles et distribution des invertébrés et microfossiles*. Bulletin des Centres de recherches exploration-production Elf-Aquitaine, Mémoire 17, 422 p.
- Dauwalder P. & Remane J. 1979: Étude du banc à Nérinées à la limite «Kimméridgien-Portlandien» dans le Jura neuchâtelois méridional. *Paläontologische Zeitschrift* 53.3-4, 163-181.
- Dumas J. & Berger J.-P. 2007: Inventaire des géotopes géologiques de la République et Canton du Jura: notice explicative. Unité de géologie-minéralogie, Département des Géosciences, Université de Fribourg, 287 p.
- Frei E. 1925: *Zur Geologie des südöstlichen Neuenburger Jura*. Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz [N.F.] 55, 99 p.
- de Graciansky P.-C., Hardenbol J., Jacquin T. & Vail P.R. (eds.): *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication 60, 786 p.
- Heim A. 1919: *Geologie der Schweiz. Band 1. Molasseland und Juragebirge*. Tauchnitz, Leipzig, 704 p.
- Hillgärtner H. 1998: Discontinuity surfaces on a shallow-marine carbonate platform (Berriasian, Valanginian, France and Switzerland). *Journal of Sedimentary Research* 68.6, 1093-1108.
- Jank M. 2004: *New insights into the development of the Late Jurassic Reuchenette Formation of NW Switzerland (late Oxfordian to late Kimmeridgian, Jura Mountains)*. Université de Bâle, 122 p.
- Marcou J. 1848: *Recherches géologiques sur le Jura salinois*. Mémoires de la Société géologique de France [série 2] 3.1, 151 p.
- Moesch D. 1867: *Geologische Beschreibung des Aargauer-Jura und der nördlichen Gebiete des Kantons Zürich*. Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz 4, 319 p.
- Morris N.J. 1968: *Stratigraphical and palaeontological researches in the Upper Jurassic rocks*. Université d'Oxford, 234 p.
- Remane J., Adatte T., Berger J.-P., Burkhalter R., Dall'Agnolo S., Decrouez D., Fischer H., Funk H., Furrer H., Graf H.-R., Gouffon Y., Heckendorf W. & Winkler W. 2005: Directives pour la nomenclature stratigraphique. Comité suisse de stratigraphie. *Eclogae geologicae Helvetiae* 98.3, 385-405.
- Schweigert G. & Callomon J.H. 1997: *Der bauhini-Faunenhorizont und seine Bedeutung für die Korrelation zwischen tethalem und subborealem Oberjura*. Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde [Ser. B] 247, 69 p.
- Sykes R.M. & Callomon J.H. 1979: The Amoeboceras zonation of the Boreal Upper Oxfordian. *Paleontology* 22.4, 839-903.
- Thurmann J. 1852: Lettres écrites du Jura à la Société d'histoire naturelle de Berne. Lettre IX: Coup d'œil sur la stratigraphie du groupe portlandien aux environs de Porrentruy. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern aus dem Jahre 1852*, 209-220.
- Xing L., Li D., Lockley M.G., Marty D., Zhang J., Scott Persons W., You H., Peng C. & Kümmell S.B. 2015: Dinosaur natural track casts from the Lower Cretaceous Hekou Group in the Lanzhou-Minhe Basin, Gansu, Northwest China: Ichnology, track formation, and distribution. *Cretaceous Research* 52.A, 194-205.
- Ziegler P.A. 1988: Late Jurassic-Early Cretaceous Central Atlantic sea-floor spreading, closure of Neo-Tethys, and opening of Canada Basin. In: Ziegler P.A. (ed.): *Evolution of the Arctic-North Atlantic and the Western Tethys*. AAPG (American Association of Petroleum Geologists) Memoir 43, 63-82.

Références Internet

- <http://www.a16.ch/a16/trace.htm>
<http://www.lejurassique.com/dinosaures/le-site-de-loulle.html>
<http://quaternaire.unblog.fr>
<http://www.cnrtl.fr>
<http://www.universalis.fr/encyclopedie/theropodes>

Contributions

Introduction	Plans synoptiques de surface
<i>Géraldine Paratte</i>	<i>Christel Lovis, Andreas Iberg, Pierre-Alain Möschler</i>
Situation géographique et géologique	Plans index des prélèvements et des moulages
<i>Géraldine Paratte</i>	<i>Marielle Lapaire, Christel Lovis, Andreas Iberg</i>
Techniques de fouille	Méthode pour isoler les pistes
<i>Géraldine Paratte</i>	<i>Bertrand Conus, Christel Lovis</i>
Topographie et carroyage	Orientation, longueur et direction des pistes
<i>Christel Lovis, Andreas Iberg, Claude Gigon</i>	<i>Bertrand Conus, Marielle Lapaire</i>
Levers de coupe	Rosaces de direction
<i>Géraldine Paratte, Gaël Comment</i>	<i>Bertrand Conus, Géraldine Paratte</i>
Numérisation des coupes	Histogrammes
<i>Géraldine Paratte</i>	<i>Bertrand Conus, Géraldine Paratte</i>
Étude des microfaciès	Prises de vues des pistes et des empreintes
<i>Géraldine Paratte</i>	<i>Olivier Noaillon, Marielle Lapaire</i>
Analyses spécifiques	Photomontages
<i>Géraldine Paratte</i>	<i>Olivier Noaillon, Géraldine Paratte</i>
Fossiles	Photos stéréo – anaglyphes
<i>Géraldine Paratte</i>	<i>Olivier Noaillon, Géraldine Paratte</i>
Analyse des surfaces et identification ichnologique	Orthophotographie
<i>Géraldine Paratte</i>	<i>Géraldine Paratte</i>
Nomenclature des empreintes et des pistes	Balayage laser
<i>Géraldine Paratte</i>	<i>Géraldine Paratte</i>
Description scientifique des pistes	Balayage laser haute définition
<i>Géraldine Paratte</i>	<i>Géraldine Paratte</i>
Paramètres de pistes : mesures de terrain	Modèles photogrammétriques 3D
<i>Christel Lovis</i>	<i>Géraldine Paratte</i>
Paramètres de pistes : données informatisées	Annexe 1
<i>Christel Lovis</i>	<i>Pascal Morisod, Géraldine Paratte</i>
Paramètres de pistes : fichiers statistiques	Annexe 2
<i>Christel Lovis</i>	<i>Bertrand Conus, Andreas Iberg</i>
Paramètres de pistes : base de données	Annexe 3
<i>Christel Lovis</i>	<i>Bertrand Conus, Andreas Iberg</i>
Description et mesure des paramètres des empreintes isolées	Annexe 4
<i>Marielle Lapaire</i>	<i>Bertrand Conus, Andreas Iberg</i>
Relevés de terrain 1:20	Annexe 5
<i>Christel Lovis, Andreas Iberg</i>	<i>Géraldine Paratte</i>
Relevés de terrain à l'échelle 1:1	Bibliographie générale
<i>Christel Lovis, Andreas Iberg</i>	<i>Géraldine Paratte, Vincent Friedli</i>
Techniques de moulage de traces de dinosaures	Couverture (modifié d'après Marty 2008)
<i>Christel Lovis, Renaud Roch</i>	<i>Géraldine Paratte, Simon Maître</i>
Techniques de prélèvement de traces	
<i>Marielle Lapaire, Martine Rochat</i>	

Remerciements

Travail de terrain

William Amougou
Jacques Ayer
Joëlle Bächler
Jean-Luc Bardot
Vincent Bélet
Sébastien Bergot
David Bigler
Pierre Bigler
Samuel Boll
Loïc Bocat
Pierre-Alain Borgeaud
Florence Bovay
Luc Braillard
Olivier Braillard
Alexandre Bregnard
Hugues Brisset
Maud Brentini
Bernard Buret
Lionel Cavin
Daniel Chételat
Karin Civelli
Gaël Comment
Bertrand Conus
Christian Doninelli
Robert Dubois
Élodie Émery
Sophie Faivre
Irénée Fleury
Fritz Fuhrer
Nadia Gagnebin
Mario Gergen
Claude Gigon
Claude Girardin
Sarah Gottet
Bernard Gruber
Mélanie Gretz
Lionel Hanser
Magali Hofstettler
Bernhard Hostettler
Andreas Iberg Hidalgo
Mathilde Jacquemet
Bernard Jeanbourquin
Christina Keller

Ralf Krebs
Olivier Kunz
Didier Lambert
Frédéric Lapaire
Marielle Lapaire
Hugues Leuenberger
Christel Lovis
Léonard Luzieux
Jean-Marc Machek
Diana Marques
Christophe Marquis
Yves Marti
Daniel Marty
Julien Mercay
Bernard Migy
Grégoire Migy
Claudine Miserez
Jacques Montandon
Steve Montavon
Marc Müller
André Nia
Olivier Noaillon
Joseph Noirjean
Natacha Oberson
Amalric Oriet
Gheorghe Pascal
Laurent Picot
Isabelle Queloz
Gaëtan Rauber
Vincent Risse
Martine Rochat
Mélanie Sandoz
Laureline Scherler
Olivier Schmidt
Sabrina Serier
Tarik Sheikh
Barbara Simon
Hervé Vaucher
Véronique Vernain-Périot
Richard Waite
Franck Widmer
Patrick Willlemin
Daniel Whittel

Préparation-conservation

Sébastien Bergot
Pierre Bigler
Bernard Buret
Fritz Fuhrer
Bernard Gruber
Jean-Marc Machek
Claudine Miserez
Régine Monnin
Joseph Noirjean
Aude-Laurence Pfister
Renaud Roch
Martine Rochat

Scientifiques internes

Jacques Ayer
Loïc Bocat
Luc Braillard
Lionel Cavin
Gaël Comment
Wolfgang Alexander Hug
Apolline Lefort

Gestion des données

Virginie Barraud
Claude Girardin
Laurence Greppo
Isabelle Groux
Pascal Morisod
Amalric Oriet

Géomatique

Claude Gigon
Andreas Iberg
Pierre-Alain Möschler

Bureau d'édition

Vincent Friedli
Marie-Claude Farine
Simon Maître

Scientifiques externes

Jean-Pierre Berger
Christian A. Meyer
Martin G. Lockley
Kent Stevens
Scott Ernst
Novella Razzolini
Diego Castanera
Tom Schanz
Hanna Haase
Expertises scientifiques: Karl Bates, Peter Falkingham, John R. Hutchinson, Martin G. Lockley, Phil Manning, Peter Jordan, Christian A. Meyer, Kent Stevens

Entreprises

Babey Sàrl
Bangerter & Amstutz SA, Lugnez (Joël De Murcia)
Berberat Polyester Sàrl, Develier
G. Cuenat SA, Courchavon (Alain Rossi)
Consortium Comment-Membrez, Courgenay
Terra Data AG, Einsiedeln
Flotron (anciennement Perrinjaquet) AG, Gümligen

Propriétaires et exploitants

Thierry Blaser, Courtedoux
André et Jean-Pierre Boillat, Courtedoux
Christian Künzi, Courtedoux
Joseph Maillat, Courtedoux
Josy et Hubert Michel, Courtedoux

Crédits

Auteurs

Géraldine Paratte
Marielle Lapaire (Cattin)
Christel Lovis
Daniel Marty

Étude

Daniel Marty
Matteo Belvedere
Géraldine Paratte
Marielle Lapaire (Cattin)
Christel Lovis

Dessins

Andreas Iberg
Pierre-Alain Möschler
Claude Gigon
Bertrand Conus
Yves Maître

Fichiers paramètres

Claude Girardin
Christel Lovis

Photographies

Nadia Gagnebin
Olivier Noaillon
Bernard Migy
Yves Marti

Dépôt des collections et de la documentation
Paléontologie A16, Porrentruy (jusqu'à fin 2018)
JURASSICA Museum, Porrentruy (dès 2019)

ISSN 2504-4745
ISBN 978-2-88436-042-5

9 782884 360425

