

Nouvelles données et interprétations du site d'Aït Blal (haut Atlas Central, Maroc)

SHINOBU ISHIGAKI¹, MOUSSA MASROUR², MOHAMED BOUTAKIOUT³, FÉLIX PÉREZ-LORENTE^{4*}

RÉSUMÉ

Aït Blal est le premier site où ont été mentionnés des dinosaures boitant à cause d'une blessure. La plupart des empreintes sont tridactyles, certaines sont tétradactyles et il y a aussi avec marques du métatarse. Dans la plupart des empreintes, les marques des orteils sont longues et très fines.

Dans le présent travail, nous décrivons deux affleurements (ABL déjà connu, et 2ABL). et nous avons tenu compte que dans le gisement d'Aït Blal:

- les empreintes sont des structures formées par le résultat de l'action d'un pied à vitesse, mouvement et d'inclinaison de pénétration variables;
- toutes les empreintes du gisement ne sont pas produites au même temps
- la composition des sédiments est différente selon les niveaux
- les propriétés physiques des sédiments sont variables dans l'espace et dans le temps.

L'article montre que, d'une part, la surface d'étude n'est pas la surface de marche et que les empreintes sont déformées pendant et après leur formation. Pour ces deux raisons, est ouverte la possibilité de modifier les premières interprétations concernant la forme originale des pieds des ichoïpoides et leur attribution à des taxons de dinosaures.

Mots clé: *Jurassique Inférieur, empreintes, dinosaurs, boiterie, déformation*

¹ Hayashibara Museum Of Natural Sciences, 1-2-3 SHImoishii, Kita-ku, Okayama 700-0907, Japan;

² Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc

³ Université Mohamed V, Rabat, Maroc

⁴ Universidad Universit de La Rioja, Edificio CT c/ Madre de Dios 51,53. 26006 Logroño felix.perez@unirioja.es

* Autor corresponsal

DOI: <https://doi.org/10.66737/ier-pub.1.17>

Aït Blal is the first site to mention dinosaurs limping as a result of a injury. Most of the footprints are tridactyl, some are tetradactyl and there are also some with metatarsal impressions. In most footprints, the digit prints are long and very fine.

In the present work, we describe two outcrops (ABL already known, and 2ABL). and we have taken into account that in ABL site:

- *the footprints are structures formed by the action of a foot at variables speed, movement and penetration angle;*
- *not all footprints are produced at the same time*
- *the sediments are different composition depending on the levels crossed*
- *the sediment properties are variable in space and time.*

The article shows that, on the one hand, the surface studied is not the tracking surface and that the footprints are deformed during and after their formation. For these two reasons, it is possible to modify the initial interpretations concerning the original shape of the trackmaker feet and their attribution to dinosaur taxa.

Key words: Lower Jurassic, footprints, dinosaurs, limping, deformation

1. INTRODUCTION

Le site des traces de dinosaures d'Aït Blal, situé dans le Haut Atlas central et daté du Jurassique inférieur, est réputé pour la présence de traces de théropodes, notamment deux pistes présentant une démarche irrégulière. Cette dernière a été interprétée par les auteurs (Jenny et Jossen, 1982; Ishigaki, 1986, 1988) comme témoignant d'un comportement de boiterie chez le dinosaure ayant laissé ces empreintes.

En nous appuyant sur la topographie du site établie par Ishigaki et Lockley (2010), nous avons réalisé un recensement exhaustif des empreintes en octobre 2024, dans le but d'analyser l'évolution de leur état de conservation depuis 2008. Cette nouvelle étude a également permis d'approfondir la description des traces grâce à l'intégration de données et d'interprétations inédites.

2. HISTORIQUE

Le site a été mentionné pour la première fois par Jenny et Jossen (1982), qui ont trouvé 37 empreintes. Le site, découvert lors de la construction d'une route, mesurait 35 m de long et 2 m de haut. Ils ont décrit les empreintes comme étant tétradactyles, bien qu'elles semblent être tridactyles parce que l'orteil I était mal marqué; les marques d'orteils étaient pointues mais il n'y avait pas de signes apparents de griffes. La longueur des pas gauches du plus longue piste est supérieure à celle des pas droits et ils supposent qu'il doit s'agir de la piste d'un animal blessé, ce qui justifie également le fait que les orteils III et IV des pieds

gauches sont très proches les uns des autres. La roche dans laquelle se trouvent les empreintes est un calcaire à stromatolites d'âge Pliensbachien.

Ishigaki (1986) a étudié le site et dans ses premières données (Ishigaki, 1988) a décrit cinq pistes et quatre empreintes isolées, y compris des empreintes didactyles. Le dernier travail publié (Ishigaki et Lockley (2010)) décrit 17 pistes et 23 empreintes isolées, soit un total de 96 empreintes décrites. La longueur de l'affleurement au moment de l'étude d'Ishigaki était de 53 mètres.

En 2008, des travaux de conservation du gisement ont commencé sur le site en nettoyant les fractures et les diaclases ouvertes et en remplissant les creux (y compris les micro-fractures) avec du mortier de chaux, de la silicone et de la résine époxy. La même année, les empreintes ont été cartographiées à nouveau, le sol de la route ayant été abaissé. Les traces n'ont pas été étudiées à cette époque, mais les travaux de conservation du site se sont poursuivis lors de la campagne de l'année suivante 2009. Dans ce travail, nous montrons les traces trouvées dans l'affleurement mentionné ci-dessus, que nous appellerons ABL, et dans un autre nouvel affleurement situé à côté du précédent (2ABL) à environ trois mètres de distance sur le bord de la route. L'ABL est actuellement de 54 mètres et comprend 85. La route est actuellement à un niveau différent de celui indiqué dans les deux observations précédentes. En octobre 2024, le niveau de la route était supérieur à celui de la cartographie d'Ishigaki de 2010.

Lors de la dernière étude (octobre 2008), de nouvelles traces ont été trouvées dans ABL, et certaines des traces citées par Ishigaki et Lockley (2010) ont été détruites par l'érosion et peut-être par des travaux routiers. Le nombre total de traces actuellement recensées dans ABL est de 86.

La modification des empreintes et du site est très évidente. Des traces manquent et les détails de celles qui sont actuellement visibles en raison de l'écaillage et de la perte de fragments de la surface d'étude due à la météorisation et à l'érosion, ainsi que de morceaux de la couche avec les traces dus à l'érosion et aux travaux routiers.

3. SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

Le site d'empreintes d'Aït Blal est situé dans le Haut Atlas central, à 30 km à l'est de la ville de Demnate et à 125 km à l'est de Marrakech (Figure 1). Il se trouve à environ 1,3 km à l'est-sud-est du village d'Aït Blal, à proximité immédiate d'un hameau appelé Tizi-n-Oubadou (Figure 2).

L'affleurement se trouve le long du talus sud d'une route goudronnée et aménagée. Cette route, lors des premières études, n'était qu'une piste étroite et accidentée reliant le village d'Aït Blal à la vallée des Aït Bouguemez (Figure 2).

Cet affleurement se présente sous la forme d'un plan de stratification visible sur le flanc de la route, entre les coordonnées: 29R 718308E - 3507670N et 718250E - 3507685N.

La direction des couches porteuses d'empreintes est: à ABL, N100°E, avec un pendage variant entre 50° et 65° vers le nord; à 2ABL, N120°E, avec un pendage mesuré à 48° vers le nord.

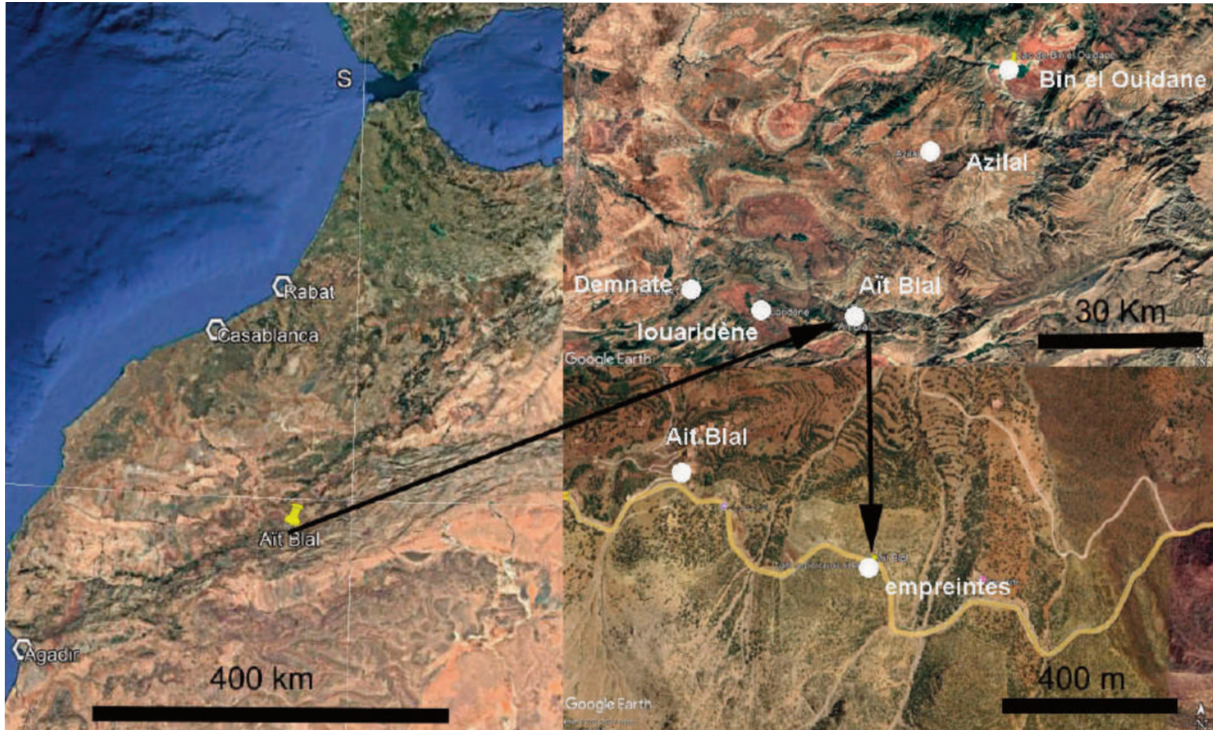


Figure 1. Situation géographique. A gauche, carte générale du Maroc occidental. A la droite, en haut, localisation des citées de Demnate et Azilal et des gisements d'empreintes de Bin el Ouidane, Iouaridène et Ait Blal. En bas, situation du douar d'Ait Blal et des gisements ABL et 2ABL (Images de Google Earth).

Des études géologiques approfondies ont été menées par Jenny et Jossen (1982), ainsi que par Jenny (1985, 1988). Ces chercheurs ont établi que la couche contenant les empreintes se situe dans la partie supérieure de la Formation d'Aganane. L'ammonite *Arietoceras cf. algovianum*, découverte dans cette partie supérieure, indique un âge Domérien moyen (Roch 1939 ; Dubar et Mouterde 1978). Par ailleurs, les foraminifères (*Mayncina termieri* et *Orbitopsella praecursor*), identifiés dans un horizon calcaire de la partie inférieure de la formation, suggèrent un âge Carixien (Du Dresnay 1979).

Ces données permettent de situer l'âge du site dans le Jurassique inférieur, plus précisément au Pliensbachien (Jenny et Jossen 1982 ; Septfontaine 1986 ; Jenny 1988).

4. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Afin d'ajouter les nouvelles données et de montrer la cartographie des pistes, un axe parallèle au niveau de la route et des références perpendiculaires à celui-ci ont été tracés à l'aide de la craie et d'un mètre ruban et toutes les pistes du site ont été photographiées. Les déformations des photographies ont été corrigées avec Adobe Photoshop et toutes les pistes ont été redessinées sur un plan avec AutoCAD. Le plan présenté (Figure 3) est rabattu par rapport à l'axe parallèle au niveau de la route, de sorte que l'orientation des empreintes et des pistes n'est pas la même que celle du plan incliné, mais varie. Cela

permet de mieux comprendre les relations angulaires entre les trajectoires des pistes et celles empreintes.

Pour les images en 3D et en fausse couleur, nous avons utilisé les logiciels Aghisoft, Meshlab et Paraview. La ligne limite des empreintes est dessinée à la craie sur la surface d'étude (Requeta *et al.*, 2006-2007), afin que soit visible notre interprétation des données morphométriques et biomorphiques.

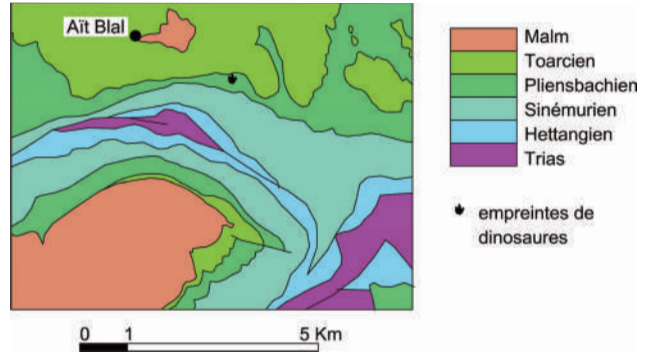


Figure 2. Situation géologique du site. Modifié de Jenny (1985)

Les empreintes ont été nommées avec les acronymes ABL et 2ABL. Les chiffres qui suivent les acronymes ci-dessus servent à identifier les traces individuelles. Ce sigle a été suivi pour ne pas les confondre avec celles mentionnées dans les travaux antérieurs (cf. Ishigaki, 1988). Ce critère a été suivi sur les sites voisins de Iouaridène (Boutakiout *et al.*, 2008).

La classification de la surface du site (Fornós *et al.*, 2002, Requeta *et al.*, 2006-2007) et des types d'empreintes selon l'origine de leurs structures ("estampes" ou "stamps", empreintes réelles, moulages, contre-moulages et sous-empreintes) est faite par plusieurs auteurs (cf. Masrouf *et al.*, 2023, 2025). Les empreintes sont groupées selon les caractères morphologiques, pas par la liaison avec l'ichnotaxonomie binomique ou relative aux les dinosaures auteurs des empreintes ou ichnopoïètes

La nomenclature utilisée est celle que nous avons suivie dans nos travaux précédents (cf. Masrouf *et al.*, 2025). Cet article publie un résumé du concept et de l'histoire du terme "estampe". L'ancienne classification des empreintes en empreintes véritables, sous-empreintes, sous-traces et moulages naturels est trop incomplète pour distinguer les empreintes formées par des autopodes passant à travers les couches (sous-traces de Garcia Ramos *et al.* [2002] et Romero Molina *et al.* [2003], ou empreintes pénétrantes de Gatesy et Falkingham [2020]). Une synthèse de la classification proposée se trouve dans Masrouf *et al.* (2023), dans laquelle le terme "true footprints" est modifié et les termes "empreintes réelles" et "estampes" sont définis. Sous-empreintes sont empreintes constituées par sédiment écrasé et déformé pendant dans le trou de l'ichnite pendant sa formation (cf. Melero and Pérez-Lorente, 2011). Mousa *et al.* (2023) ont écrit "... use real footprints for the traces shown by direct structures, deformed or not (Requeta *et al.*, 2006–2007; Pérez-Lorente, 2015). We separate the real footprints into. i) footprints totally or partially limited by direct structures on or under the tracking surface; ii) true footprints, deformed or not that remain on the same tracking surface; iii) stamps are the real footprints that are the faithful representation of the base of the autopodium (Brown, 1999; Requeta *et al.* 2006–2007)".

5. ICHNOLOGIE

La terminologie ichnologique utilisée est basée sur les travaux de Haubold (1971), Demathieu (1986), Casanovas *et al.* (1989), Thulbron (1990), Leonardi (1987) et Pérez-Lorente (2015). Nous considérons toutes

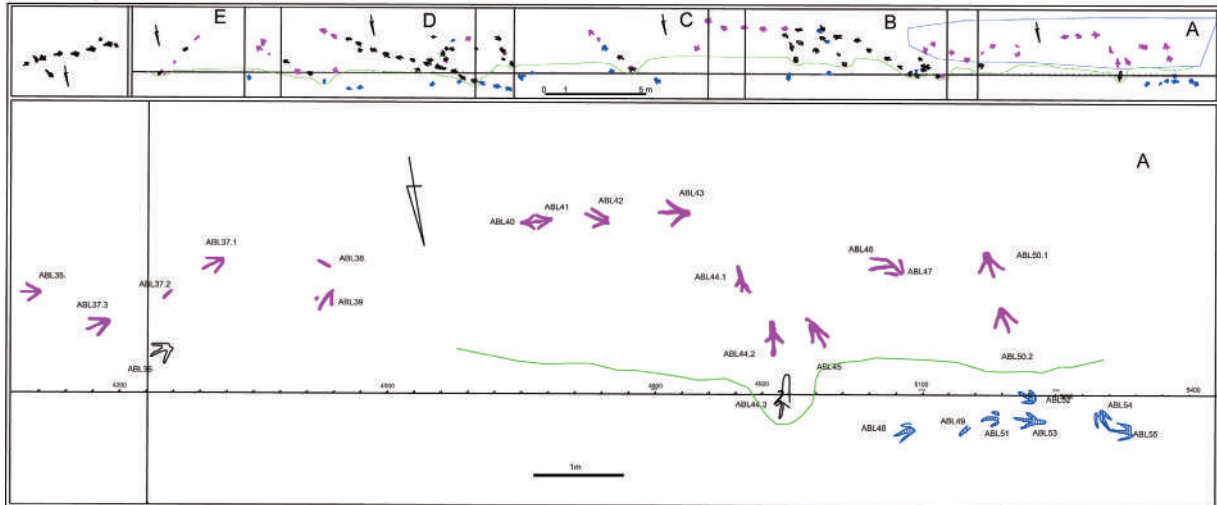


Figure 3a Plan du site ABL et 2ABL. A gauche, en bas, 2ABL; au dessus l'affleurement occidental (ABI) divisé en cinq secteurs (A, B, C, D, E). A droite le secteur A. En rouge, les empreintes décrites par Ishigaki et Lockley (2010) qui ne sont pas retrouvées aujourd'hui. Les empreintes encore reconnaissables sont tracées en noir. Les lignes représentant les nouvelles empreintes, ainsi que la trame qui les remplit, sont en bleu.

les empreintes décrites ici comme des empreintes théropodes (cf Mínguez Ceniceros *et al.*, 2024) au sens de Thulborn (1990) et Romero Molina *et al.* (2003). Nous considérons les pistes comme des séquences d'empreintes avec 3 ou plus de 3 empreintes, les paires d'empreintes comme des groupes de seulement deux empreintes laissées par le même ichnopoiète, et les empreintes isolées comme celles formées par une seule empreinte qui ne peut pas être associée à une ou plusieurs autres dans une séquence possible. Les formules pour le calcul de la hauteur de l'acétabulum sont celles de Thulborn (1990), et celles d'Alexander (1976), Demathieu (1986) et Thulborn (1990) pour le calcul de la vitesse. La nomenclature et les abréviations sont celles traditionnellement utilisées par une partie de l'équipe dans la description de tous les gisements du Maroc. Les paramètres et les relations utilisés sont détaillés dans le tableau 1.

La nomenclature des empreintes (par exemple 2ABL1.2) tient compte de l'affleurement (ABL ou 2ABL), de la piste (2ABL1) et du numéro ordinal de l'empreinte (2ABL1.2 ou deuxième empreinte de la piste 2ABL1 de l'affleurement 2ABL du site d'Aït Blal ABL).

Le travail d'Ishigaki et Lockley (2010) sert de base à la description des traces et des pistes, mais dans cet article nous considérons les apports de la morphologie des traces indépendamment du dinosaure qui les a marquées. C'est-à-dire en examinant leur processus de formation en tenant compte du type et du comportement de l'ichnopoiète, du comportement de la boue, des phases de l'action du pied pendant le contact sur et dans le substrat (Thulborn et Wade, 1989) et de l'évolution ultérieure de la roche qui les contient: érosion et déformation synsédimentaire, compactation, diagenèse, déformation postérieure (tectonique, morphologique, ...), érosion actuelle..

La description des deux affleurements est faite séparément, car l'emplacement des sites (ABL et 2ABL), les niveaux sédimentaires où se trouvent les empreintes et leur type (semiplantigrades dans 2ABL) sont différents.

NOUVELLES DONNÉES ET INTERPRÉTATIONS DU SITE D'AÏT BLAL (HAUT ATLAS CENTRAL, MAROC)

empreinte	I	Im	a	P	z	Ar	Lr	Ap	II [^] III [^] IV	O	h	z/h	z/l	v1	v2	Ar/a	(I-a)/a	Direction
ABL55	29	19	19						-----(-39)		141						0.53	N108E
ABL54	24	19	19						-----(-45)		111						0.26	N164E
ABL53	27	36	19						-----(-63)		136						0.42	N112E
ABL52	22	16	16						-----(-57)		101						0.37	N129E
ABL51	27	17	17						-----(-67)		132						0.59	N102E
ABL50.2	30	27	27						-----(-65)		146						0.11	N350E
ABL50.1	30	29	29	62					-----(-84)		146						0.34	N348E
ABL50	30	28	28		62				-----(-72)		146						0.22	N349E
ABL49									-----(-49)									
ABL48		19	19						-----(-38)									N72E
ABL47	25	24	24						-----(-63)		116						0.04	N144E
ABL46																		N92E
ABL45	32	20	20						-----(-49)		160						0.06	N162E
ABL44.3	23	39	17						-----(-54)		106						0.35	N10E
ABL44.2	26	39	20	68	139				-----(-105)		127	1.3	6.9	4.6	3.4		0.8	N10E
ABL44.1	19	32	13	72					-----(-83)		86						0.46	N332E
ABL50	22	37	17	70	139				-----(-81)		106	1.3	6.9	4.6	3.4		0.54	N357E
ABL43	36	30	30						-----(-85)		178						0.2	N97E
ABL42	29	20	20						-----(-49)		276						0.45	N124E
ABL41	20	17	17						-----(-56)		101						0.18	N100E
ABL40	23	15	15						-----(-81)		106						0.06	N278E
ABL39	23	21	21								106						0.09	N48E
ABL38																		
ABL37.5	24	18	18						-----(-48)		116						0.33	N53E
-----					146							1.2	5.6	4.0	3.6			
ABL37.3	29	23	23						-----(-54)		141						0.26	N76E

Tableau 1. Mesurements et relations des caracteres des empreintes et des pistes.

ABL2.X	21		23							96										-0.1		N212E

ABL2.1	23		16							106										0.44		N187E
ABL2	22		20							101										0.17		N200E
ABL1.4																						
ABL1.3				82	169	3		173			19											
ABL1.2				87	172			180														
ABL1.1				84																		
ABL1				84	170	3		176			19											
2ABL3.2																						N123E
2ABL3.1	23		10								43									1.3		N131E
2ABL3	23		10								43									1.3		N127E
2ABL2.2	20		18																	0.11		N330E
2ABL2.1	20		17	13	103															0.54		N339E
2ABL2	20		19	15	103															0.33		N334E
2ABL1.6	23		28	24																-0.04		N252E
2ABL1.5	24		11	26	91	169	0	28	180		-14	111	1.7	7.7	6.8	4.7	0		-0.08			N278E
2ABL1.4	22		16	26	84	161	5	29	165		8	101	1.6	7.3	6.3	4.5	0.3		-0.15			N280E
2ABL1.3	20		21	19	84	166	6	36	165		3	91	1.7	7.5	6.6	4.7	0.3		0.05			N268E
2ABL1.2	24		11	31	95	169	1	177			19	111	1.7	7.7	6.8	4.7	0.03		-0.19			N244E
2ABL1.1	17		11		84	168						76	1.7	7.6	6.8	4.7						
2ABL1	22		16	25	88	167	3	31	171		4	99	1.7	7.6	6.7	4.7	0.16		-0.08			N265E

Abreviaciones: l, longueur de l'empreinte digitigrade; lm, longueur de l'empreinte métatarsienne; a, largeur de l'empreinte; P, longueur du pas; z, longueur de l'enjambée; Ap, angle du pas; II^{IV}, angles interdigitaux (II^{IV} entre parenthèses); O, orientation selon Leonardi (1987); h, hauteur acétabulaire (Thulborn, 1990); z/h, enjambée relative (Thulborn, 1990); z/l, indice de Sternberg (1926); v, vitesse selon Alexander (1976); v_z, vitesse selon Demathieu (1986); Ar/a, largeur relative de l'empreinte (Pérez-Lorente, 2001); (l-a)/a, longueur relative de l'empreinte (Pérez-Lorente, 2001). Direction, orientation de la marche

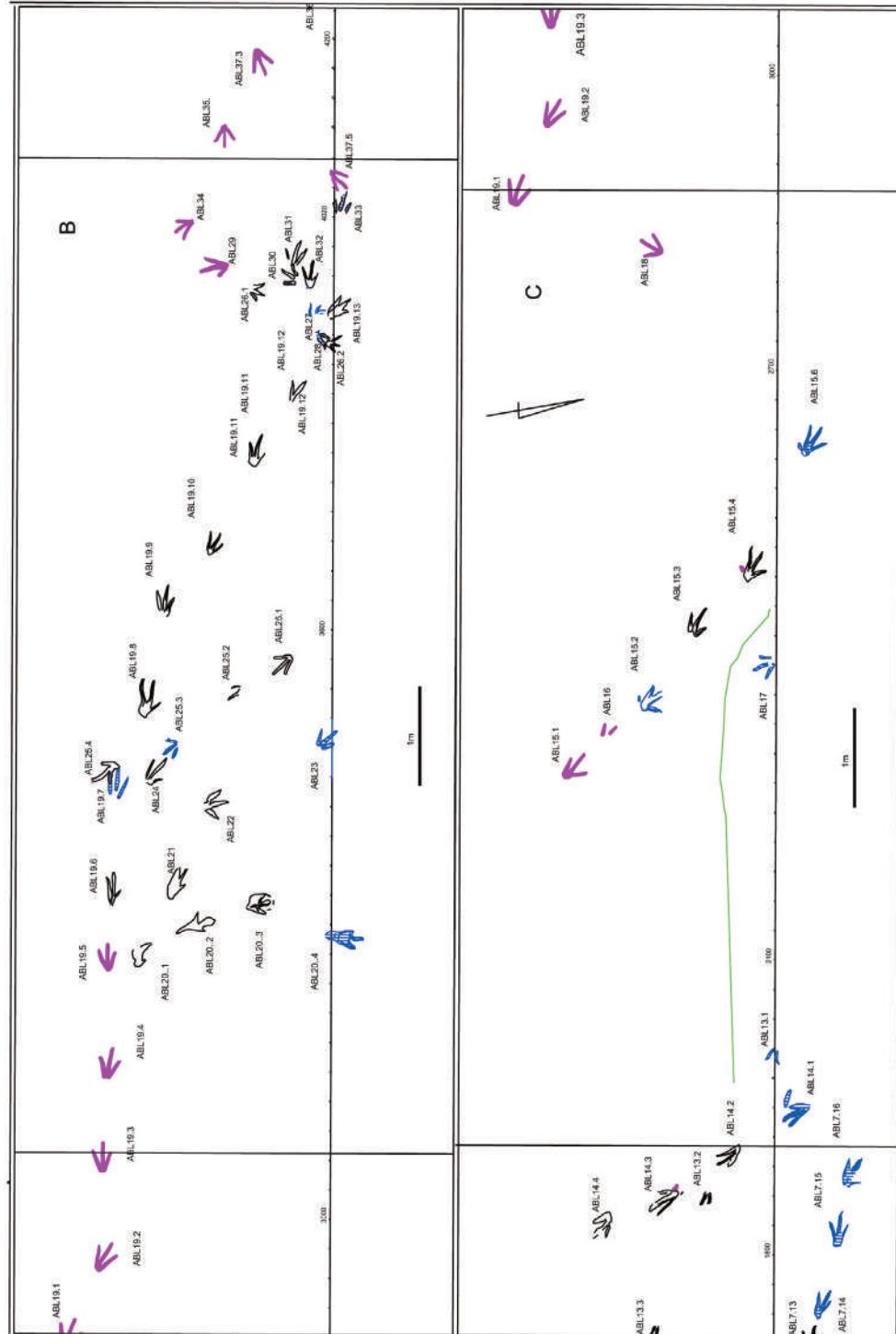


Figure 3b Secteurs B et C. En rouge, les empreintes décrites par Ishigaki et Lockley (2010) qui ne sont pas retrouvées aujourd'hui. Les empreintes encore reconnaissables sont tracées en noir. Les lignes représentant les nouvelles empreintes, ainsi que la trame qui les remplit, sont en bleu.

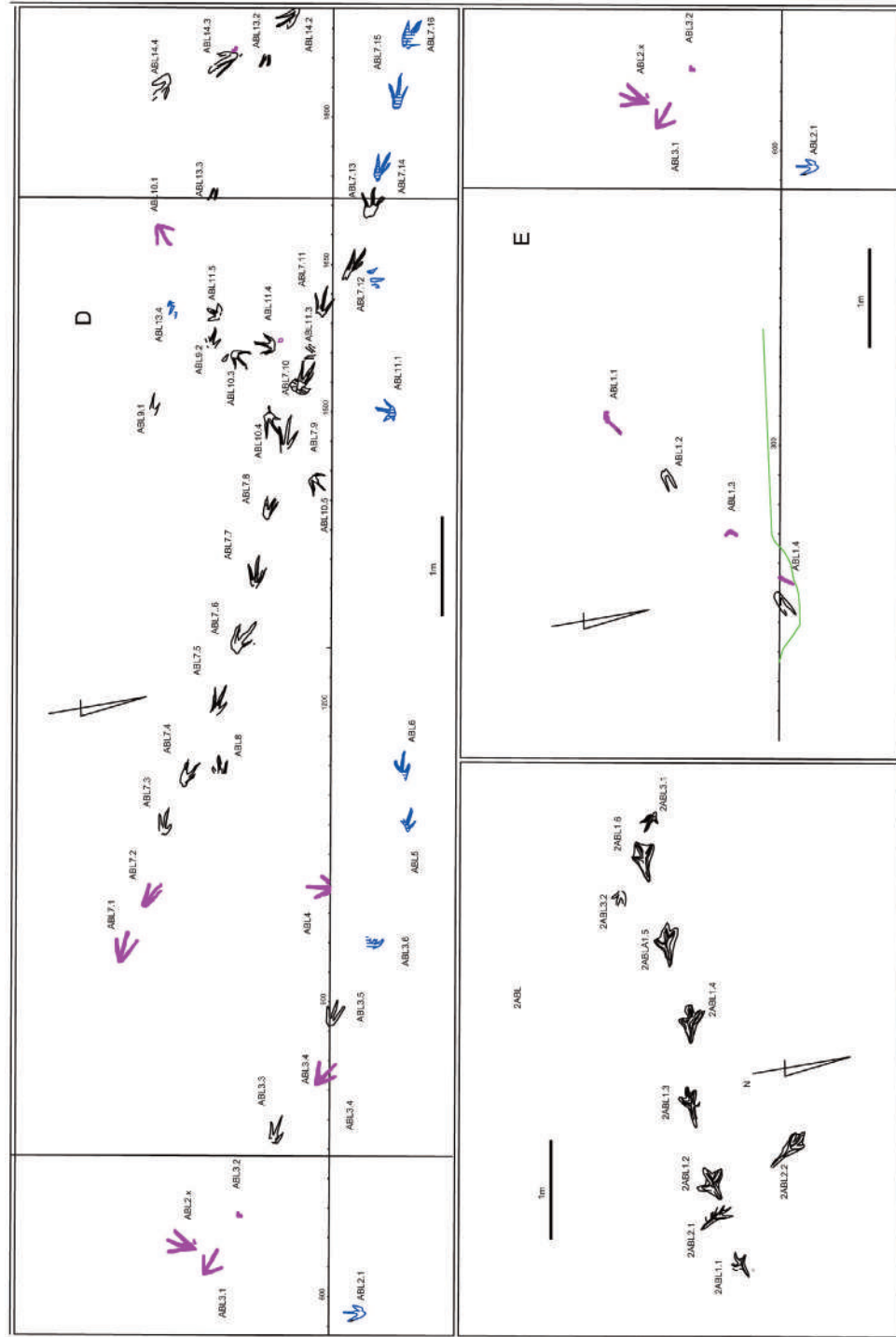


Figure 3c. Secteurs D et E. En rouge, les empreintes décrites par Ishigaki et Lockley (2010) qui ne sont pas retrouvées aujourd'hui. Les empreintes encore reconnaissables sont tracées en noir. Les lignes représentant les nouvelles empreintes, ainsi que la trame qui les remplit, sont en bleu. Partie droite inférieure ZABL.

5.1 GISEMENT ABL

Il contient (Figure 3, Tableau 1) 85 empreintes réparties en 38 empreintes isolées, 4 paires d'empreintes et 13 pistes. Le tableau 2 montre la corrélation entre les empreintes décrites par Ishigaki et Lockley (2010) et celles de ce travail.

La taille varie de 13 cm (ABL13.3) à 39 cm (ABL19.8). Ishigaki *et al.* (2010) les ont divisées en:

- i) empreintes didactyles, tridactyles et tétradactyles;
- ii) empreintes à grands angles interdigitaux et à petits angles interdigitaux, et;
- iii) empreintes contenues dans des pistes à pas régulier et à pas irrégulier.

Cette séparation est toujours valable et est maintenue dans la présente étude, avec des modifications mineures.

Il existe des empreintes dont les proportions entre les orteils, la valeur des angles interdigitaux et la forme du talon (Figure 4) ne présentent aucune variation apparente par rapport aux empreintes tridactyles standard; elles ne sont pas anormalement longues, déformées et également la forme du talon est cohérente avec la forme anatomique de la plante des pieds des théropodes. Les empreintes des pistes ABL2 et ABL11 sont des exemples. Mais ce n'est pas le cas du site, qui se caractérise par l'étroitesse de la plupart des empreintes et les anomalies des formes du talon, des orteils et des angles interdigitaux. L'orientation de ces traces et pistes varie de N3W à N19E.

Nous n'avons pas trouvé de marques claires de coussinets interdigitaux ou de griffes. La ligne limite des orteils ne présente pas d'étranglement et le bas de l'empreinte ne présente pas de crêtes (il est lisse ou strié) dues aux limites entre les coussinets.

Dans la description suivante, nous respectons la description présentée par Ishigaki et Lockley (2010) mais nous séparons la description des empreintes de celles de leurs pistes. Ainsi, nous distinguons d'abord les

1	2	1	2
A	ABL1	n	ABL37
a	ABL2	o	ABL35
B	ABL3 + ¿ABL5, ABL6?	N	ABL37
b	ABL4	p	ABL36
C	ABL7	q	ABL38
c	ABL8	r	ABL39
D	ABL10	s	ABL40
d	ABL10	t	ABL41
E	ABL9	O	ABL42, ABL43
F	ABL11	P	ABL44
	ABL12	u	ABL45
G	ABL13	v	ABL46
H	ABL14	w	ABL47
I	ABL15 ABL16		ABL48
	ABL17		ABL49
e	ABL18	Q	ABL50
J	ABL19		ABL50
K	ABL20		ABL51
f	ABL21		ABL52
g	ABL22		ABL53
	ABL24*		ABL54
L	ABL25		ABL55
M**	ABL26, ABL28		
h	ABL27		
i	ABL30		
j	ABL29		
k	ABL31		
l	ABL34		
m	ABL33		
1. Travaux précédents. 2 Ce travail * dans la piste J d'Ishigaki ** double empreinte *** N et n sont dans la même piste			

Tableau 2.. Nomenclatures ancienne et actuelle des empreints.



Figure 4. ABL2.1, ABL11.5. Empreintes tridactyles dont les angles interdigitaux, l'emplacement et la forme de l'axe des orteils et la forme du talon n'indiquent pas de déformation. La base des orteils est lisse ou striée. Longueur des échelles: 10 cm.

empreintes didactyles et tétradactyles, puis nous considérons les caractères de profondeur des marques, les formes des orteils et des talons, y compris le tracé de leurs lignes limites, ainsi que les structures des parois et du fond des ichnites.

5.1.1. EMPREINTES DIDACTYLES

Ishigaki (1988) a distingué ces empreintes. L'une d'entre elles (piste A ou ABL1) présente actuellement le même nombre d'empreintes, tandis que dans l'autre (piste G ou ABL13), deux nouvelles empreintes ont été découvertes (ABL13.1 et ABL13.4).

Dans ABL1 (figure 3, 5), il n'y a que 3 empreintes sur les 4 citées par Ishigaki, mais celles qui sont préservés n'offrent pas de variations par rapport à celles décrites précédemment. D'après la position des empreintes par rapport à la trajectoire (d'un côté ou de l'autre de l'axe de la piste), ABL1.2 et ABL1.4 sont des empreintes droites, de sorte que le doigt latéral devrait être le doigt IV. Nous supposons donc que les orteils marqués dans les deux cas sont les orteils III et IV. Aucun signe de remplissage du trou des empreintes ou d'affaissement avec fermeture des parois de la trace d'un doigt latéral n'a été détecté.

Dans ABL13, on a trouvé deux autres nouvelles empreintes de pieds qui ne marquent que deux des trois orteils. Les ichnites G1 et G2 correspondent à ABL13.2 et ABL13.3. La distance entre les empreintes est



Figure 5. Empreintes didactyles ou avec seulement deux marques d'orteils conservées. A (ABL1.4), empreinte droite avec des marques profondes III et IV. B (ABL13.2), empreinte peu profonde avec une marque possible du doigt IV. Echelles de 10 cm.

cohérente pour toutes les empreintes de la piste: longueur du pas (Tableau 1) entre ABL12.1-ABL13.2-ANL13-3-ABL13.4 = 160-145-124 cm; pas moyen 143 cm. Le marquage des empreintes de ABL13 (Figures 3, 5, 6) est didactyle dans tous ses ichnites et consiste en un doigt long, parallèle à la trajectoire et un doigt court qui forme un angle plus grand avec la trajectoire, mais toujours du même côté. C'est-à-dire que si la trace de l'orteil long parallèle à la trajectoire est considérée comme III, l'orteil court serait le II ou le IV en alternance, selon l'empreinte considérée. La position du doigt subparallèle à l'axe de la piste pourrait correspondre à celle du III. Il est possible que dans ABL13.1 il y ait des restes (bien que très diffus à cause de l'érosion) de la marque d'un doigt sur le côté droit de l'empreinte (probablement le II) et qu'il y ait aussi une partie de la cicatrice de l'effondrement du IV sur le côté droit de ABL13.2 (Figure 5). Les marques des deux orteils présentent des stries inférieures qui doivent être d'effondrement et non de traînées, car il n'y a pas de boue traînée et accumulée dans la partie proximale des traces. Sur ABL13.3 (G2), le long orteil a des parois verticales, et l'orteil latéral est parcourue par une incision qui se poursuit le long de l'arrière de l'extrémité de l'orteil. Cette incision ne présente pas non plus de marques de glissement de l'ongle ou de l'orteil, il pourrait donc s'agir d'un effondrement de la paroi de l'empreinte. La dernière des empreintes est à nouveau superficielle, comme ABL13.1. Si l'on considère que la piste est

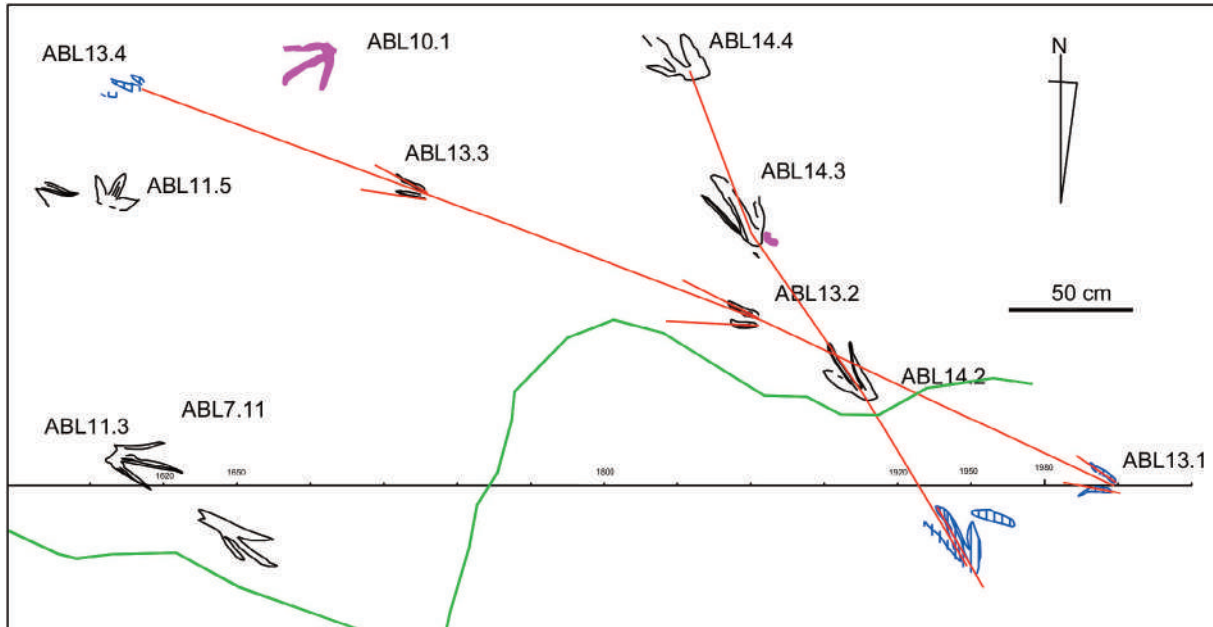


Figure 6. ABL13, Empreintes didactyles ou avec seulement deux marques d'orteils conservées.

composée d'empreintes gauche et droite, il manquerait le doigt II dans ABL13.2 et ABL13.4 et le doigt IV dans ABL3.1 et ABL3.3. Les doutes qui surgissent sont dus au fait que le remplissage sélectif ou la réduction des empreintes digitales effacerait:

- i) dans le cas où seules les empreintes gauches ont été conservées, les empreintes droites qui ne sont pas observées et la marque du doigt intérieur (II).
- ii) dans le cas où les empreintes gauche et droite sont conservées, uniquement la marque du doigt latéral placée sur le côté gauche de la piste (II ou IV alternativement)
- iii) ou s'il s'agit bien de traces didactyles (dans lesquelles la longueur des deux orteils varie alternativement à chaque pas).

Cette piste est également particulière en raison de la vitesse de marche, proche de 10 km/h.

5.1.2. EMPREINTES TÉTRADACTYLES

Les pistes D (ABL10), F (ABL11) et I (ABL) (Figure 3) sont caractérisées par leur angle interdigital élevé et par la présence d'un marquage de l'hallux dans certaines de leurs traces.

Dans la piste D (ABL10), les trois empreintes persistent, mais nous n'avons pas trouvé de marques d'hallux dans la dernière des empreintes. Dans ABL11(F), nous avons trouvé une nouvelle empreinte au début de la piste que nous appelons ABL11.1. Les deux autres empreintes (ABL11.2 et ABL11.4) n'ont pas de marque d'hallux.

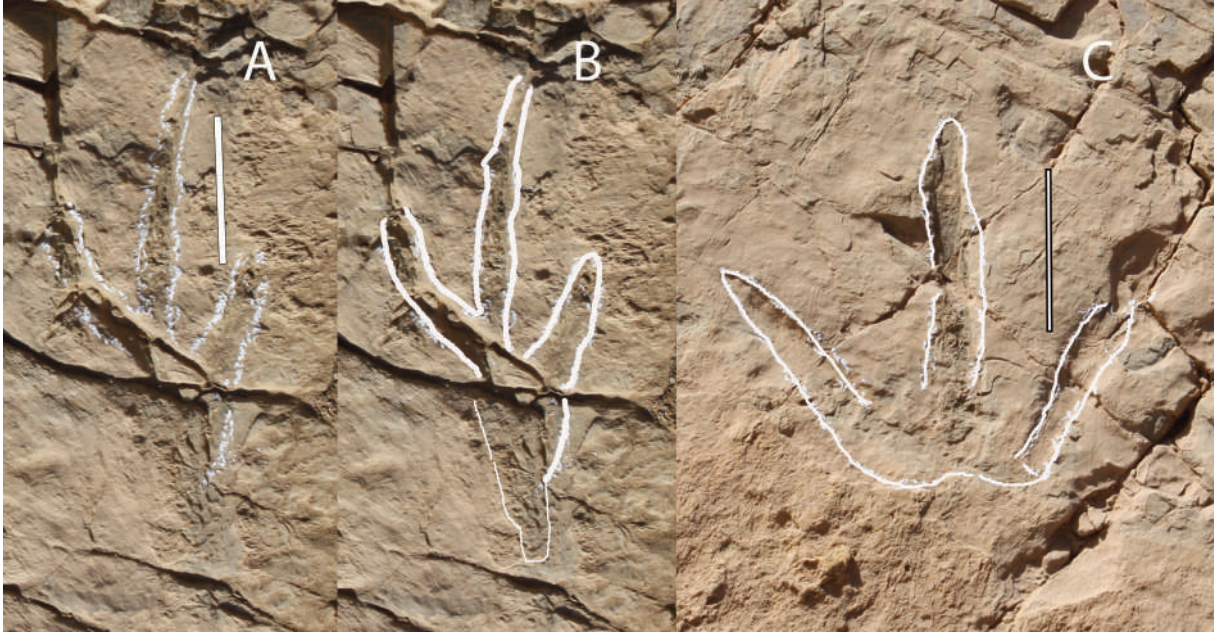


Figure 7. A, B (ABL6) empreinte peu profonde; A, photographie avec ligne limite de l'empreinte à la craie; B, ligne limite blanche épaisse et ligne entourant les laminites un peu déformées au postérieur de l'ichnite. C (ABL25) autre exemple d'empreinte peu profonde. Echelles de 10 cm.

Dans le piste F (ABL11), il y avait des empreintes connues (ABL11.3, ABL11.4 et ABL11.5) de part et d'autre de la marque de l'hallux (F2 ou ABL11.3 et F3 ou ABL11.5). Actuellement, elles sont visibles dans ABL11.1 et ABL11.4.

Enfin le piste I (ABL15) dans lequel la première empreinte n'a pas été retrouvée, ni l'hallux de la quatrième (ABL15.4), mais une nouvelle ABL15.6 a fait surface qui montre également sa marque.

Les marques de l'hallux sont très peu profondes et dans plusieurs des empreintes, l'espace qui devrait occuper cette marque est brisé et il manque du matériel. Il est possible que les premières observations aient été faites alors que les structures étaient mieux conservées, la surface d'étude n'étant pas altérée ou érodée. Il est donc probable que les marques d'hallux restantes disparaissent bientôt.

5.1.3. EMPREINTES SUPERFICIELLES ET PROFONDES

Des empreintes profondes et peu profondes peuvent également être distinguées sur le site. Parmi les empreintes peu profondes (Figures 4, 7), on peut citer ABL11 et les empreintes apparues après les travaux d'Ishigaki (ABL2.1, ABL5, ABL6, ABL17).

Les empreintes profondes (figures 5A, 8) sont abondantes chez ABL (quelques didactyles, tridactyles et tétradactyles). Il y a des exemples avec des empreintes profondes dans leur totalité, et d'autres où une partie de l'empreinte est plus profonde : il peut s'agir de la partie du talon (Ishigaki et Lockley, 2010), de la partie avant (ABL7.9, ABL 20.4), ou la marque d'un des orteils peut être plus profonde (ABL14, Figure 9).



Figure 8. A (ABL20.3), empreinte profonde sans marque métatarsienne. B (ABL20.4), empreinte profonde avec marque métatarsienne; pas de marque hallux visible. C (ABL44.3), empreinte profonde avec marque métatarsienne; il n'est pas possible de distinguer s'il y a une marque d'hallux. D (ABL53) empreinte relativement peu profonde bien que la partie métatarsienne et une partie de la partie digitigrade soient remplies de sédiments. Les échelles de A, C, D sont de 10 cm. La longueur du stylo en B est de 135 mm.



Figure 9. Images en fausses couleurs et courbes de niveau des trois premières empreintes de ABL14. A, B (ABL14.3, gauche); C, D (ABL14.2, droite); E, F (ABL14.1, gauche). Notez la différence de profondeur entre la marque de l'orteil II (peu profonde et large) et celles des orteils III et IV (profondes et étroites). Aucune marque de l'hallux n'est visible. Echelle 10 cm. La longueur du stylo est 135 mm.

5.1.3. EMPREINTES PROXIMALEMENT LARGUES

Elles sont généralement profondes et correspondent à deux morphologies différentes. L'une dans laquelle le talon est bilobé ou présente deux rainures correspondant à l'orteil II et à la paire III-IV (Figure 9) et l'autre dans laquelle le talon est arrondi et les orteils divergent à partir d'un point plus avancé (Figure 10).

Dans le premier cas, la marque du talon de l'orteil peut être une paroi (Figure 8E, G, H, I) ou être ouverte vers l'arrière, à travers laquelle passent les deux rainures mentionnées n (Figure 9E, F). Alors que les



Figure 10. Plusieurs empreintes provenant de la plate ABL7. Les empreintes impaires (A, B, C, D, E, F) sont à gauche et les empreintes paires (G, H, I) sont à droite. A (ABL7.3), talon partiellement ouvert et marques d'orteils plates, peu profondes (II, IV) et profondes (III); prolongement arrière de la marque d'orteils IV et restes de remplissage sédimentaire postérieur. B (ABL7.5), prolongement arrière des marques III-IV à travers la marque ouverte du talon ; remplissage du creux de II et restes d'un niveau post-empreinte derrière l'empreinte et entre les marques d'orteil III et IV et sur le côté de l'orteil IV, C (ABL7.7), talon recouvert par des niveaux post-empreinte. D (ABL7.7), talon complètement recouvert par des lamines post-empreinte. E (ABL7.13) Empreinte très déformée avec talon bilobé et partie proximale élargie; au bas de l'empreinte il y a une continuation de la marque d'orteil jusqu'au talon ; les lobes correspondent à la partie proximale de l'orteil II et des orteils III-IV. F (ABL7.15) talon bilobé correspondant au début des marques d'orteils II et III-IV; marque d'orteil profonde avec rainure inférieure. G (ABL19.8), marque de talon légèrement bilobée; IV relarquement étroit, court et parallèle à III; stries inférieures sur III et IV; II partiellement comblé. H (ABL7.10), orteil IV pratiquement toujours effondré angle III^IV très bas; remplissage des orteils III et IV; talon large; stries ou effondrement de la partie apicale de la base de II et III. I (ABL7.12, paroi verticale du talon montrant deux extrémités postérieures acuminées; IV petit, étroit et avec un angle interdigital très faible; orteils affaissés avec stries inférieures. Echelles de 10 cm



Figure 11. A (secteur proximal) dans lequel on peut distinguer quelques laminites de celles qui remplissent B (ABL7.9, empreinte complète). Le fond de II est le moins profond, probablement parce que le matériel de remplissage est mieux préservé. L'échelle de B est de 10 cm.

marques d'orteils sont généralement étroites, la zone proximale de l'empreinte est relativement large. Les traces dans lesquelles ces structures sont très claires sont celles des pistes ABL3, ABL7 et ABL19 et sont également évidentes dans ABL15.

Dans ABL7, toutes les traces ne sont pas identiques parce que:

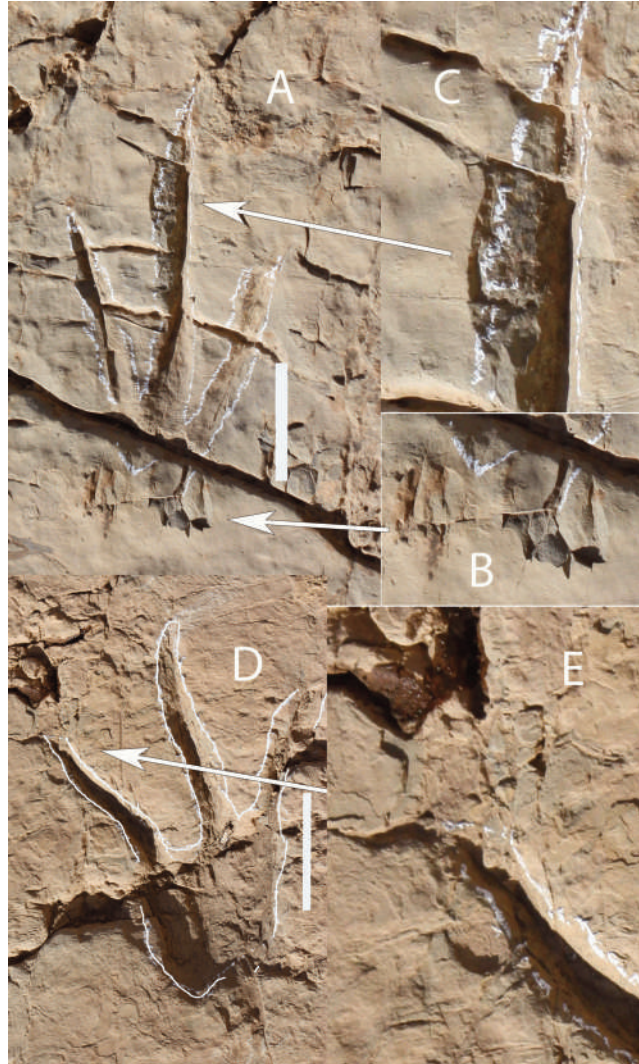
- (i) l'observation de Jenny y Josen (1982) selon laquelle l'orteil IV du pied droit est plus proche de l'orteil du milieu dans les empreintes droites et que les pas de gauche-droites sont plus courts que ceux droite-gauche.
- ii) La différence de longueur et de largeur entre les orteils des empreintes est répétée, mais ne coïncide pas avec celle décrite puisque les orteils latéraux plus étroits ou plus courts peuvent être II ou IV, de même que l'angle interdigital plus ouvert peut être $II \wedge III$ ou $III \wedge IV$.

Les lobes et les deux structures qui se poursuivent vers l'arrière sous forme de deux sillons correspondent aux deux terminations postérieures du pied que nous associons aux coussinets proximaux. Un lobe correspond à la partie proximale de l'orteil II et l'autre à la jonction des orteils III-IV. Il s'agit probablement de l'image de la structure anatomique, au moins des parties molles, du pied du dinosaure: la partie élevée du talon n'a pas laissé de marque car il s'agit d'un espace ouvert, et là, il n'est pas possible de dessiner le contour de l'empreinte. Il n'est pas exclu que les rainures arrière soient des structures de glissement du pied formées pendant la phase T de Thulborn et Wade (1989).

La forme des traces profondes à talon arrondi (Figure 8) est associée à celle des traces semi-plantigrades décrites dans la littérature. Nous avons trouvé deux pistes et une empreinte isolée qui répondent à cette exigence : ABL20, ABL44 et ABL53.

ABL20.1 est tellement érodé qu'aucun détail original ne subsiste. ABL20.2 et ABL20.4 se présentent sous la forme d'empreintes semi-plantigrades typiques, tandis que dans ABL20.3 la marque métatarsienne est indiscernable. Il est possible que dans ABL20.3 le métatarse ait également pénétré dans la boue et se soit effondré au cours de son processus de formation (le marquage des orteils - courts et profonds, III très étroit - est cohérent avec ce comportement). De ABL44, seule une empreinte (ABL44.3) est conservée, laquelle présente les mêmes caractères que ABL20.2 et ABL.4. Les deux pistes coïncident également en termes de forme, d'orientation et de direction de déplacement. Il n'est pas sûr qu'il s'agisse d'empreintes droites ou gauches, car la trajectoire des deux est courbe et la marque de l'hallux n'est pas détectable.

ABL55 est différente des empreintes antéropres en raison de: i) son orientation; ii) qu'elle est moins profonde et; iii) que ses orteils sont plus longs et mieux définis. Il s'agit d'une empreinte gauche en raison de la position de l'orteil II légèrement séparé de l'ensemble III-IV. Les traces des pistes ABL20 et ABL44 sont probablement les traces les plus profondes de l'affleurement. Dans certaines d'entre elles, la partie métatarsienne est exempte de sédiments et la digitale est remplie de sédiments jusqu'au niveau de la semelle métatarsienne



devraient continuer à couvrir les trous des orteils. D (ABL7.13) où la zone distale de IV est recouverte par des laminites supérieures ; E détail de l'image précédente (D). Echelle de 10 cm

5.1.4. OBSERVATIONS SUR LES STRUCTURES DES EMPREINTES ABL

En examinant la surface d'étude de l'affleurement, on constate qu'il ne s'agit pas de la même surface. Ceci est normal dans tout site ichnologique car l'érosion n'agit pas uniformément sur toute la surface. Le détail à observer est de savoir si les niveaux d'affleurement sont ceux de la surface de marche (Fornós *et al.*, 2002) ou s'il y a plusieurs niveaux impliqués sur la surface qui peuvent modifier substantiellement les observations. A ABL, la surface montre qu'à l'intérieur de certaines empreintes nouvellement affleurantes, il y a des restes de sédiments plus argileux qui n'ont pas été érodés (ABL20.4, ABL53) alors que dans les autres, ces sédiments (s'ils en contenaient) ont été éliminés par l'érosion. Dans ce cas, il est tout à fait possible que la surface de marche soit au moins préservée sous la surface argileuse.

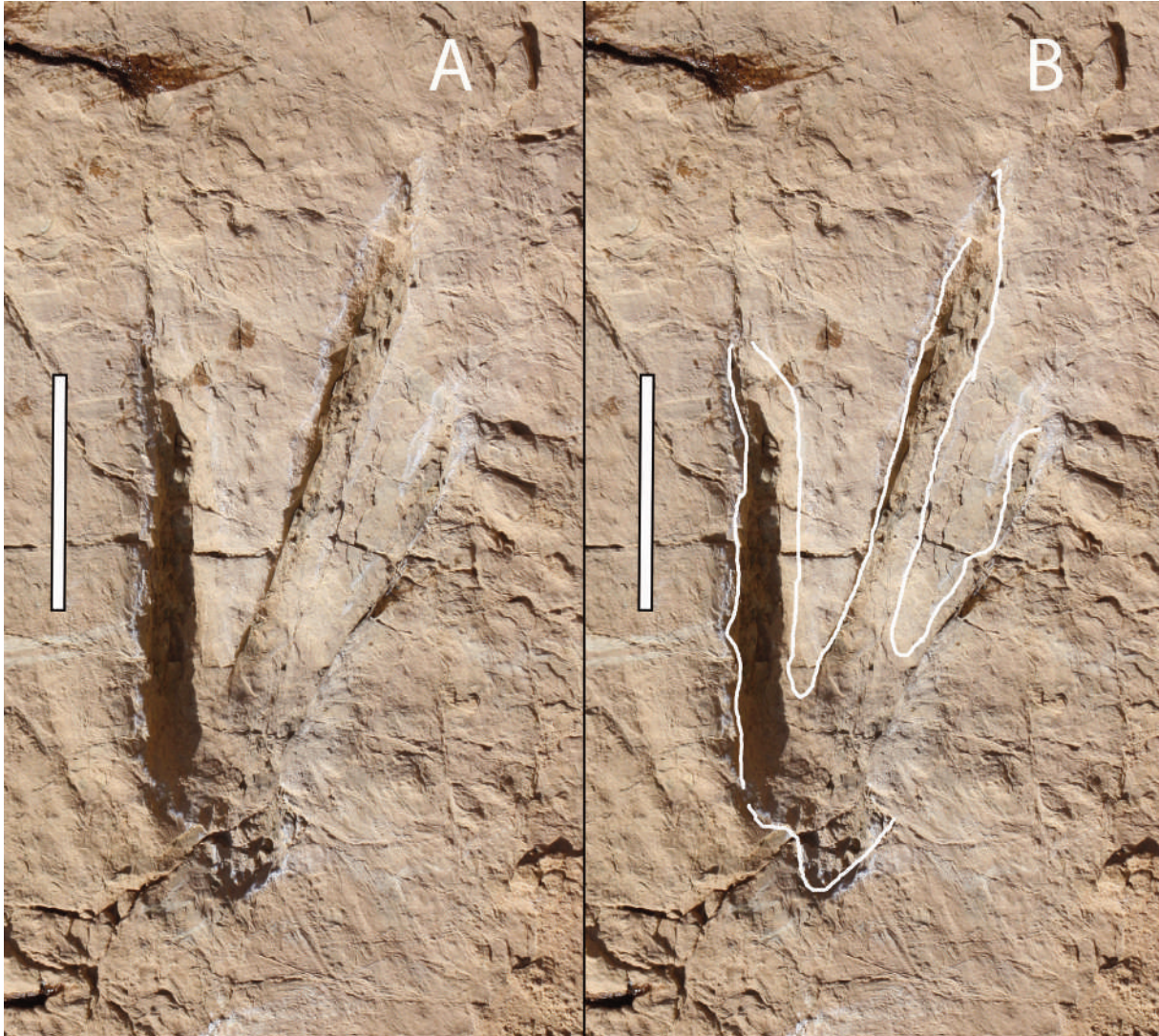


Figure 13. ABL7.1. Le doigt IV est partiellement recouvert par l'un des niveaux supérieurs. Echelle de 10 cm.

Dans de nombreuses empreintes, on trouve des sédiments post-dinosauriens pas, qui remplissent (contre-moules) et même recouvrent les empreintes. Ces sédiments ne se distinguent pas à l'œil nu de ceux foulés par les dinosaures. Nous avons trouvé de nombreuses preuves de remblayage après la formation des traces, dont des exemples sont présentés ci-dessous. Dans ABL7.9 (Figure 11), des restes de remblai cachent le talon de l'empreinte dans la zone où les orteils se rejoignent et, sur la photo, on peut également voir que les restes occupent une partie de la base du II. Parfois, la rupture des lamelles est plus évidente car des marches d'escaliers restent comme des témoins de leur existence (Figure 12), couvrant parfois aussi une partie des empreintes: l'extrémité d'un des orteils (Figure 12D,E) ou la partie latérale de l'empreinte, de la zone du talon à l'extrémité distale d'un des orteils (Figure 13). Il n'est pas exclu que, au moins pour certaines empreintes, le remplissage fasse disparaître la marque des orteils. Nous ne pouvons pas

déterminer si le niveau inférieur de toutes les empreintes correspond à une structure directe ou s'il s'agit de moulages. Nous ne savons pas si sous les structures directes (Gatesy, 2003), c'est-à-dire sous la surface de marche, il y a des empreintes transmises ou des “undertracks”. Nous n'avons pas trouvé de structures de traînées d'ongles ou de ruptures de pénétration associées aux stries qui occupent la partie inférieure des traces de doigts, et nous ne pouvons pas non plus associer la déformation des laminites à la déformation produite par le passage des doigts (Hadri *et al.*, 2012; Falkingham et Gatesy, 2014). Il est probable que les stries soient liées à la compression des parois de l'empreinte. Si les laminites étaient déjà déformées par le piétinement, il y aurait des “undertracks”.

Les dimensions de la longueur et de la largeur des marques d'orteils de la plupart des empreintes ne correspondent pas aux structures anatomiques des autopodes connus des dinosaures. La différence de largeur des marques digitales latérales de nombreuses empreintes, parfois si étroites que leurs parois se touchent, ne va pas non plus dans le sens de cette interprétation. Il ne faut pas oublier que ce n'est pas toujours la même marque de doigt qui provient d'une piste complètement amincie. Il y a des marques très profondes où les parois sont relativement plates, mais il y a aussi des marques très profondes où les parois sont bombées en raison du mouvement de la boue après qu'elle a été traversée par le pied. Il est possible que dans certaines parties de certaines pistes, l'un des orteils latéraux soit apparemment plus fermé que les autres, mais ce fait ne se vérifie pas pour tous. Nous associons l'étroitesse des traces au mouvement de la boue sur les parois qui, dans certains cas, se produirait pendant la formation de l'empreinte (phase K de Thulborn et Wade, 1989), tandis que dans d'autres, elle peut être attribuée à d'autres causes.

Nous ne disposons pas de critères permettant de déduire si les ichnites des pistes didactyles ABL1 et ABL13 sont dues à l'un des processus ci-dessus ou s'il s'agit d'empreintes didactyles originelles. Le piste ABL1 est très mal conservé en raison de l'altération et de l'érosion de la roche, de sorte que nous ne disposons pas de données d'observation suffisantes. Bien qu'ABL13.2 (figure 5) semble présenter les restes d'un des orteils latéraux effondrés, cette structure ne peut être considérée comme définitive car elle n'est répétée dans aucune des empreintes de la piste. D'après la position et les dimensions des empreintes, la marque de l'orteil central existerait dans toutes les empreintes, mais l'orteil latéral conservé serait alternativement le II ou le IV. Ceci n'est pas justifié à moins que l'élimination de l'autre orteil latéral soit sélective (seulement dans la partie droite de l'arête) ou que si les empreintes proviennent du pied gauche, l'élimination concerne la partie droite de l'arête comprenant les empreintes droites et l'orteil interne (II) des empreintes gauches.

Nous (Masrour *et al.*, 2025) avons récemment publié un article sur des empreintes de pas provenant d'un site à Imilchil (AAI) où la longueur par rapport à la largeur des empreintes de pas varie en fonction de l'orientation des empreintes de pas. Nous avons appliqué la même technique aux empreintes de ce site, qui consiste à étudier la relation entre la variation de la longueur des empreintes en fonction de leur largeur ($[l-a]/a$) et de l'orientation de leur axe. Les données sont présentées dans le tableau 1 et le tableau 3 des données générales et sont projetées dans la figure 14. Dans le tableau 3, les empreintes sont classées en fonction de la variation de ce rapport, qui irait (Pérez-Lorente, 2001) d'empreintes larges à des empreintes très étroites ($-0,3 = [l-a]/a > 1$). La projection montre que les empreintes les plus étroites seraient orientées entre N120-130E et les plus larges entre N20-40E. Il n'y a pas de signes de rupture associés à cette déformation, à l'exception des stries qui courent le long de la base de certaines empreintes et qui

1	2	3	4	5
-0.3	ABL28	N23E	N23E	N23E
	ABL26	N28E	N28E	N28E
-0.22	ABL30	N219E	N39E	N39E
-0.2	ABL11.5	N217E	N37E	N37E
	ABL7.8	N311E	N131E	N49W
-0.12	ABL34	N154E	N154E	N26W
	ABL17	N167E	N167E	N13W
-0.04	ABL22	N358	N178E	N2W
	ABL11.1	N200	N20E	N20E
	ABL11.4	N198E	N18E	N18E
	ABL10.1	N55E	N55E	N55E
-0.01	ABL36	N73E	N73E	N73E
0	ABL10.3	N70E	N70E	N70E
0.04	ABL47	N144E	N144E	N36W
	ABL4	N193E	N13E	N13E
0.06	ABL40	N278E	N98E	N82W
0.07	ABL19.7	N107E	N107E	N73W
0.08	ABL18	N222	N42E	N42E
0.09	ABL39	N48E	N48E	N48E
	ABL35	N100	N100E	N80W
0.1	ABL7.13	N278E	N98E	N82E
0.11	ABL50.2	N348E	N192E	N12W
0.13	ABL10.3	N55E	N55E	N55E
	ABL13.1	N134E	N134E	N56W
0.14	ABL23	N327E	N147E	N33W
0.18	ABL41	N280E	N100E	N80E
	ABL25.1	N146E	N146E	N34W
0.20	ABL43	N97E	N97E	N83E
0.25	ABL25.4	N156E	N156E	N24W
	ABL15.6	N213E	N33E	N33E
	ABL3.4	N323E	N143E	N37W
0.26	ABL37.3	N53E	N53E	N53E
0.3	ABL37.1	N74E	N74E	N74E
	ABL23	N327E	N147E	N33W
0.31	ABL15.4	N312E	N132E	N48W
0.33	ABL37.5	N53E	N53E	N53E
0.34	ABL50.1	N350E	N170E	N10W

Tableau,3. Orientation des empreintes selon sa longueur relative.

NOUVELLES DONNÉES ET INTERPRÉTATIONS DU SITE D'AÏT BLAL (HAUT ATLAS CENTRAL, MAROC)

0.35	ABL44.3	N10E	N10E	N10E
0.36	ABL31	N117E	N117E	N63W
0.37	ABL52	N129E	N129E	N51W
	ABL19.1	N298E	N118E	N62W
0.4	ABL15.2	N334E	N154E	N26W
0.41	ABL19.10	N317E	N137E	N43W
0.42	ABL53	N112E	N112E	N68W
0.44	ABL2.1	N187E	N7E	N7E
0.45	ABL40	N278E	N98E	N82E
	ABL19.2	N311E	N131E	N49W
0.46	ABL44.1	N332E	N152E	N28W
	ABL19.4	N292E	N112E	N68W
0.5	ABL15.3	N316E	N136E	N44W
0.55	ABL19.5	N280E	N100E	N80W
	ABL19.3	N279E	N99E	N81W
0,59	ABL51	N102E	N102E	N78W
	ABL19.13	N329E	N149E	N31W
0.6	ABL45	N342E	N162E	N18E
	ABL24	N322E	N142E	N38W
0.62	ABL19.8	N292E	N112E	N78W
0.68	ABL7.11	N289E	N109E	N71W
0.7	ABL14.3	N159E	N159E	N21W
	ABL3.5	N296E	N116E	N64W
0.71	ABL32	N287E	N107E	N73W
0.75	ABL3.3	N299E	N119E	N61W
0.78	ABL14.1	N160E	N160E	N20W
0.8	ABL44.2	N10E	N10E	N10E
0.81	ABL14.2	N157E	N157E	N23W
0.83	ABL19.11	N294E	N114E	N66W
	ABL19.9	N289E	N109E	N71W
0.84	ABL7.7	N285E	N105E	N75W
0.89	ABL7.15	N285E	N105E	N75W
0.93	ABL7.2	N295E	N115E	N65W
1	ABL13.2	N127E	N127E	N53W
1.08	ABL19.6	N287E	N107E	N73W
1.1	ABL7.3	N324E	N144E	N36W
1.17	ABL13.3	N128E	N118E	N62W

1.29	ABL7.14	N311E	N131E	N49W
1.31	ABL7.4	N288E	N108E	N72W
1.44	ABL21	N311E	N131E	N49W
2	ABL7.12	N318E	N138E	N42W
1, (l-a)/a. 2, sigle. 3, direction (vers). 4, direction jusqu'à 180°E. 5, direction jusqu'à 90°				

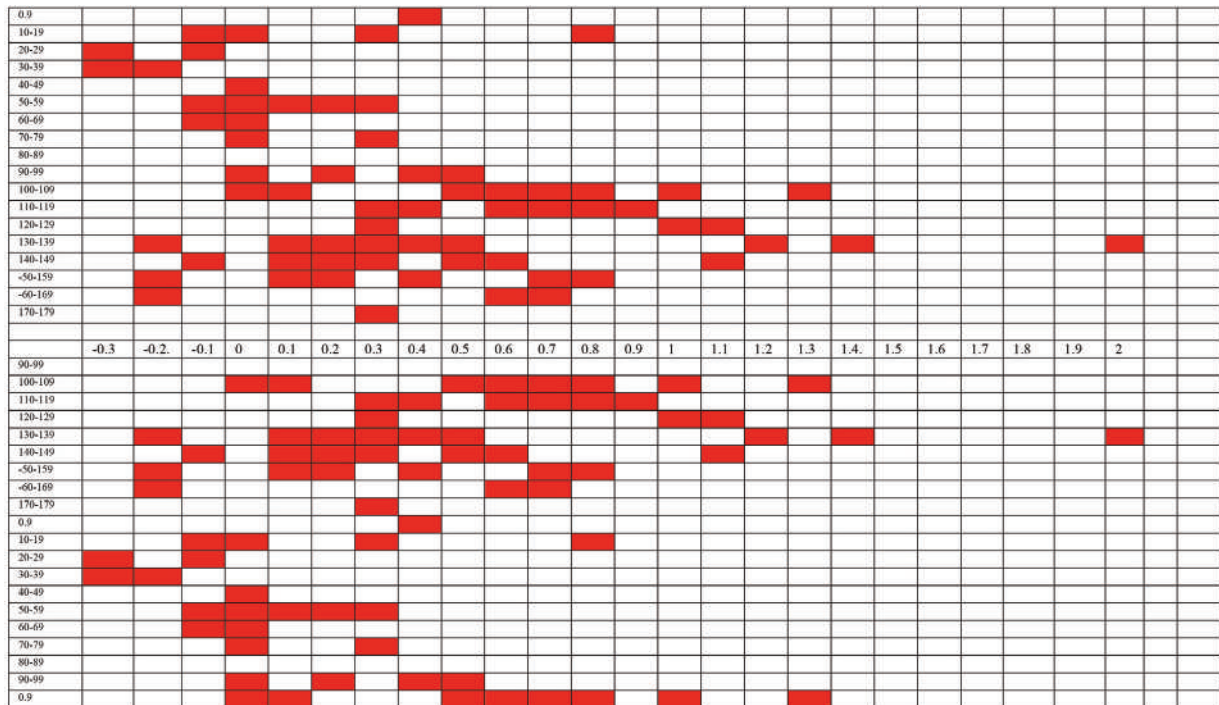


Figure 14. Projection de la relation entre la longueur relative des empreintes et l'orientation de leur axe longitudinal. L'orientation préférentielle des empreintes en fonction de leur longueur relative est visible. L'orientation N120-130E coïncide avec les empreintes de plus grande longueur relative, tandis que l'orientation N20-30E est suivie par les empreintes de moindre longueur relative.

peuvent parfois être dues aux laminites piégées entre les parois. La déformation s'est probablement produite alors que la roche n'était pas entièrement lithifiée. Pour l'instant, nous ne disposons pas de critères permettant de savoir si la déformation est due à un écrasement général ou à un cisaillement.

5.1.5. LES PISTES

Dans l'affleurement, 13 pistes ont été distinguées contenant environ 74 empreintes si l'on tient compte des traces trouvées par Ishigaki (cf. Ishigaki et Lockley, 2010). Le nombre de pistes citées est approximatif car certaines empreintes pourraient peut-être être incorporées dans les pistes ABL3, ABL7 et ABL19. La classification des empreintes (grand-petites, tes étroites...tres larges) et des pistes c'est proposée par Pérez-Lorente (2001. cf, Pérez-Lorente, 2015)

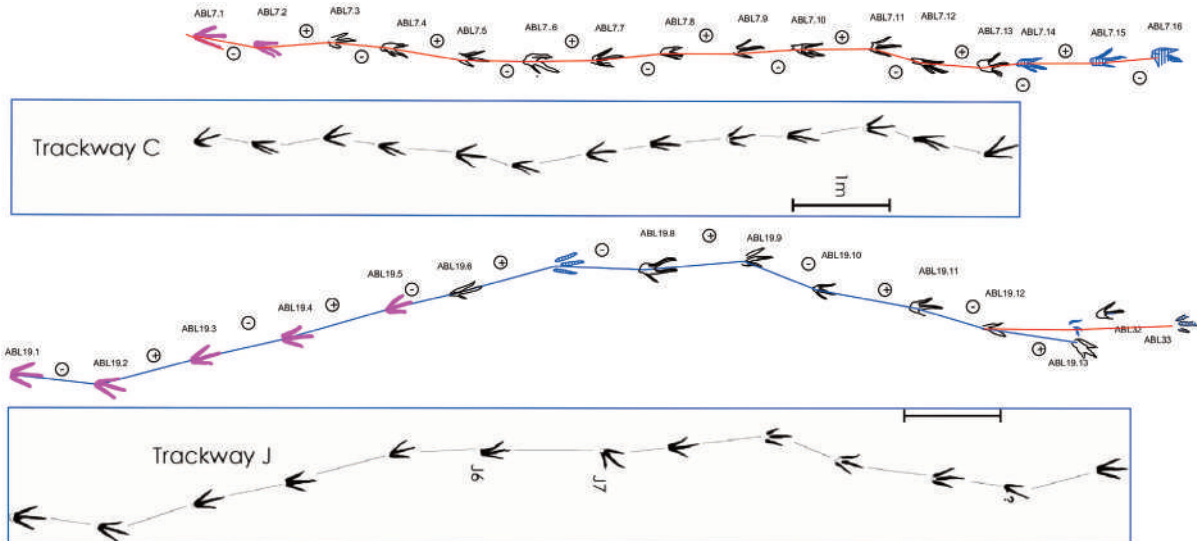


Figure 15. Pistes ABL7 et ABL19. Comparaison avec ceux déjà décrits par Ishigaki et Lockley (2010). Dans la figure, les pas longues (+) et courtes (-) ont été marquées pour mettre en évidence le fait. L'alternance des pas est maintenue tout au long des deux pistes.

- ABL1 ne présente aucune variation par rapport aux travaux précédents.
- ABL3 a également la même interprétation que celle décrite ci-dessus. La variation importante concerne le nombre de pistes puisque ABL3.1, ABL3.2, ABL3.4 n'ont pas été détectées, mais ABL3.5 a été trouvée et ABL5 et ABL6 appartiennent probablement à la même piste.
- ABL7. piste avec de grandes empreintes ($l = 33 \text{ cm}$) dans laquelle les deux empreintes initiales de la piste (C1, C2 ou ABL7.1, ABL7.2) n'ont pas été distinguées dans cette travail mais trois ont été ajoutées à la fin de la piste (ABL7.14, ABL7.15, ABL7.16) (Figures 3, 15). Si l'on tient compte des deux empreintes initiales, il mesurerait actuellement 10 m. Il s'agit d'une piste très étroite ($Ar/a=0,3$) dont l'axe de la piste est ajusté à la trajectoire (ligne joignant la empreinte initiale à l'extrémité de la piste); les empreintes ne sont pas toutes placées proprement de part et d'autre de la ligne médiane (les droites à droite et les gauches à gauche) de sorte que l'angle de pas prend des valeurs négatives. Les angles interdigitaux ne suivent pas le modèle des ichnites théropodes ($II^{\wedge}III < III^{\wedge}IV$) de sorte que la moyenne de ces valeurs est $II^{\wedge}III^{\wedge}IV = 24^{\circ} \text{---} 16^{\circ}$. Dans les anciens travaux (Jenny et Josen, 1982) il était mentionné que la marque de l'orteil IV du membre droit était plus courte et plus étroite que les deux autres orteils. Ce fait est maintenu dans les empreintes nouvellement découvertes, mais il est également observé dans l'orteil II des empreintes ABL15 et ABL17, ce qui n'invalide pas la proposition de Jenny et Josen (1982). Un autre fait à souligner est la différence entre la longueur des pas droite-gauche (courts) et gauche-droite (longs) qui est maintenue dans l'ensemble de la piste. Tous les auteurs qui ont écrit sur ce site considèrent que le dinosaure était boiteux, ce qui justifie aussi la différence de forme des orteils.
- ABL10 incorpore l'empreinte d'Ishigaki (ABL10.1).
- ABL11 incorpore la nouvelle empreinte ABL11.1.

- ABL13 incorpore deux nouvelles empreintes ABL13.1 et ABL13.4 (Figure 3). Cette piste présente deux particularités très apparentes: il est didactyle et ses empreintes présentent un orteil long parallèle à la ligne médiane et un orteil court toujours situé à gauche de l'orteil long. La longueur de l'empreinte est courte (16 cm) alors que le pas et la enjambée sont longs (respectivement 143 et 287 cm), ce qui conduit à des valeurs de vitesse (9 km/heure) et de rapport z/l (19,9) très élevées, compatibles avec des dinosaures aux membres très longs et fins. La piste est très étroite ($Ar/a=0,2$). En principe, cette piste n'est pas normale dans le sens où les orteils II-III ou III-IV sont imprimés alternativement le long de la piste. L'interprétation de ABL13 en cas d'absence d'une partie de l'empreinte (doigts II et IV en alternance) ou des empreintes droites (ou gauches?) plus l'empreinte du doigt II (IV?) est compliquée.
- ABL14 c'est une piste avec des empreintes larges ($l=32$ cm) et très étroites ($Ar/a=0,1$). Orteils très étroits et angle interdigital faible correspondant à celui des ichnites théropodes ($II^{\wedge}III^{\wedge}IV = 19^{\circ}---34^{\circ}$). Cette valeur est la plus faible de toutes les empreintes de l'affleurement. La trace des doigts III et IV est très étroite et profonde, tandis que II présente une zone peu profonde et relativement large. Nous ne savons pas si ce qui occupe le vide dans II est un remplissage après la phase K de Thulborn et Wade (1989), ou l'effondrement des parois par déformation, ou les deux processus.
- ABL15 ici manquent les empreintes I1, I2 (ABL15.1, ABL16) dont la seconde a été retirée de la piste dans cette étude. Empreintes larges ($l = 32$ cm) et étroites ($l-a/a=0,36$) avec angle interdigital $II^{\wedge}III < III^{\wedge}IV$. Orteils très longs et étroits, talon bilobé très apparent dans ABL15.3.
- ABL19 dans laquelle, les cinq premières empreintes (J1 à J5) du travail d'Ishigaki n'ont pas été distinguées, et d'autres ont été ajoutées à la fin de la piste ce qui complique l'interprétation. On a trouvé l'empreinte ASBL19.7 dont la position dans la piste est plus correcte que l'empreinte J7 d'Ishigaki et Lockley (2010). L'équivalent actuel de J7 est ABL24. Si ABL33 fait partie de la piste, la ligne droite entre ABL19.1 et ABL33 est de 12 m. Il s'agit d'une piste très étroite ($Ar/a=0,4$) dont la ligne médiane se trouve à 81 cm de la trajectoire à ABL19.8. Les angles interdigitaux sont également contraires au modèle des ichnites de théropodes ($II^{\wedge}III^{\wedge}IV = 21^{\circ}---16^{\circ}$), mais les traces sont placées alternativement sur les côtés de l'axe de la piste (empreintes droites à droite et empreintes gauches à gauche). Contrairement à ABL7, les empreintes de droite ont un orteil II plus court et plus étroit que l'orteil IV et le pas gauche-droit (moyenne 82 cm) est plus court que le pas droit-gauche (102 cm). Des travaux antérieurs sur le site suggèrent également que l'ichnopoïète était boiteux.
- ABL20 et ABL44 (pistes K et P d'Ishigaki) sont deux pistes avec des traces du métatarse et des empreintes très profondes. Dans ABL20, ABL20.4 a été ajoutée, ce qui n'existait pas auparavant, et dans ABL44, les trois premières empreintes ont été détruites. Dans les deux cas, les orteils sont étroits et courts, probablement en raison de l'effondrement des murs, sauf dans ABL20.4 où l'on peut voir que le sol de l'empreinte est moins profond dans la partie métatarsienne que dans la partie digitigrade, ce qui est interprété comme une empreinte dans laquelle la phase W de Thulborn et Wade (1989) est divisée en deux mouvements (Pérez-Lorente, 2015): l'appui initial du métatarse et des orteils (le pied s'enfonce à une certaine profondeur) et l'élévation du métatarse et l'appui ultérieur dans le pied digitigrade (tout le poids du dinosaure repose sur les orteils) qui s'enfonce plus profondément dans la boue. Les deux pistes coïncident également en ce sens qu'ils ont les empreintes les plus profondes, sont parallèles, vont dans la même direction et tournent du même côté.

- ABL25 est une piste dont quatre empreintes très détériorées ont été conservées. Il ne fournit aucune donnée intéressante pour la présente étude.
- ABL37 Aucune trace de cette piste n'est actuellement conservée.

5.2. AFFLEUREMENT 2ABL

A l'est de l'affleurement précédent, sur la même pente que la route, se trouve un autre affleurement avec des traces que nous avons désignées par l'abréviation 2ABL. C'est la première fois que ce site est décrit.

Le gisement (Figure 16) contient deux couples d'empreintes (2ABL2, 2ABL3) et un piste (2ABL1). Les couples 2ABL1 et 2ABL2 sont des empreintes marquées par des métatarses (Figures 16, 17), tandis que le couple 2ABL3 est constituée de deux empreintes tridactyles.

De la couple 2ABL3, seul 2ABL3.1 possède la ligne limite complète et des caractères valides pour la description. Il s'agit d'une empreinte tridactyle, plus longue (23 cm) que large (16 cm), étroite ($[l-a]/a = 0,44$) avec des orteils bien marqués (à l'exception de l'orteil IV qui présente une très petite marque). La divergence est cohérente avec les empreintes théropodes ($II \wedge III = 10^\circ < III \wedge IV = 61^\circ$). Le talon est très saillant, dans le prolongement postérieur de III-IV, et avec une encoche bien marquée dans la partie proximale de II.

2ABL2 est formé de deux ichnites avec des marques métatarsiennes. Les orteils sont individualisés et, comme dans presque toutes les empreintes de ce site, la partie profonde de la marque de l'orteil est recouverte d'une strie ou d'une fracture. Il est possible qu'une marque d'hallux soit présente sur 2ABL2.1. Les angles interdigitaux ne sont pas réguliers, de sorte que dans une empreinte, soit $III \wedge IV$ est majeur et dans l'autre c'est l'inverse.

2ABL1 contient 6 empreintes dans lesquelles la longueur de la trace du pied digitigrade (22 cm) est supérieure à celle de la trace du pied métatarsien (16 cm). Les empreintes sont plus larges ($a=25$ cm) et sont classées comme larges ($[l-a]/a = -0,08$).

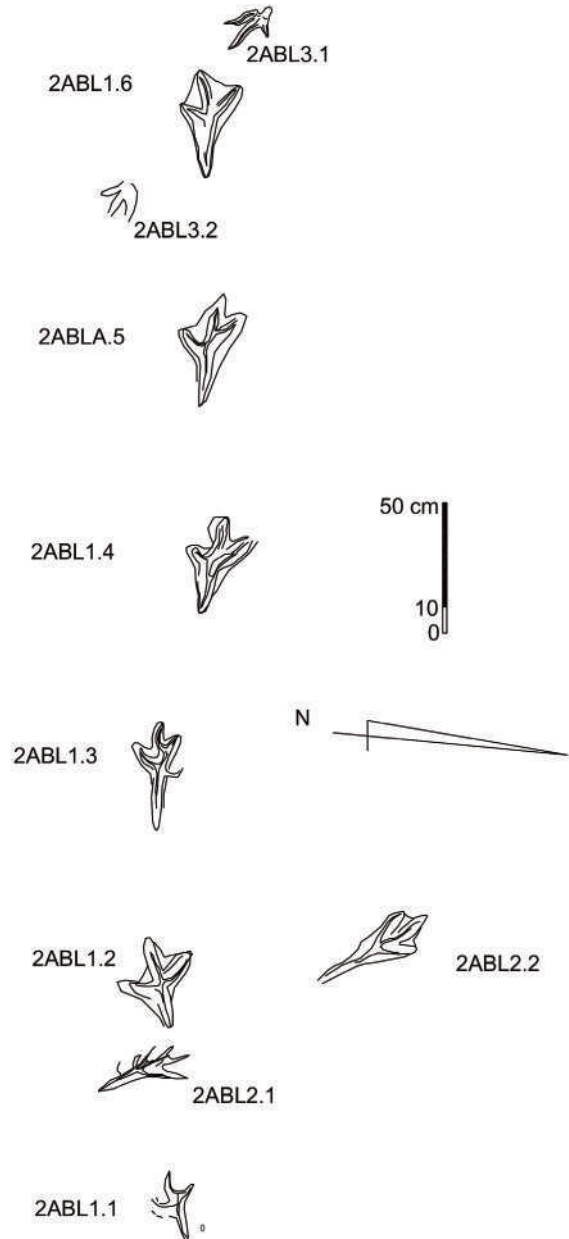


Figure 16. Cartographie des pistes 2ABL.



Figure 17. Images de lignes de contour de plusieurs ichnites avec des marques métatarsiennes 2ABL.

Les angles interdigitaux sont conformes aux valeurs normales ($II^{\wedge}III = 25 < III^{\wedge}IV = 48$). Comme dans la plupart des pistes semi-plantigrades (Kuban, 1989; Pérez-Lorente, 1983) la vitesse est paradoxalement élevée, près de 7 km/heure selon la formule d'Alexander (1976).

6. DISCUSSION

ABL est un site où les éléments morphologiques et extramorphologiques coexistent dans les empreintes sous forme de morphotypes complexes difficiles à interpréter. Les structures de déformation produites pendant les phases d'empreintes (talons bilobés, empreintes profondes, déformation plastique des parois) sont reconnaissables. Il est probable que la variation de la profondeur des empreintes, les structures d'effondrement, l'absence de bavures d'extrusion de boue et les formes anormales des empreintes soient au moins en partie dues au fait que le substrat foulé était très mou mais cohérent. Nous suggérons cette deuxième possibilité car, en général, la fermeture des empreintes est sélective et il n'y a pas d'empreinte où toutes les parois s'effondrent de la même manière.

Il existe des critères qui suggèrent que le passage des dinosaures s'est produit à des moments différents car des traces profondes et peu profondes des mêmes morphotypes (semi-plantigrade ou digitigrade) coexistent, ce qui est peut-être lié au passage non simultané d'ichnopoïètes.

7. CONCLUSIONS

Le site d'Aït Blal est un exemple des difficultés inhérentes à l'étude des empreintes de dinosaures. En principe, la plupart des empreintes d'Aït Blal ne sont pas des reproductions fidèles des semelles des pieds, bien que certaines d'entre elles puissent avoir des structures directes (Gatesy, 2003) et être des empreintes véritables.

Une des difficultés est que la surface d'étude n'est pas la surface de marche. La surface d'étude n'est pas le sommet d'une couche non altérée, mais il y a des vestiges discontinus de lamines sus-jacentes qui sont postérieures à l'ichnopoïèse.

Les lamines des sédiments ultérieurs, lorsqu'elles se déposent sur les empreintes, modifient la forme et le volume visible de la totalité ou de certaines parties du trou. Les laminites sont parfois très difficiles à détecter car la couleur, la composition et la structure des sédiments sont similaires.

Il existe des structures de déformation synsédimentaire et ultérieure visibles dans le rétrécissement et l'effondrement des parois de certaines traces, de sorte que le rétrécissement des marques ne peut être attribué de manière irréfutable à la reproduction fidèle d'éléments anatomiques. D'autre part, des arguments ont été fournis qui indiquent la relation entre la forme des empreintes et la déformation postérieure, c'est-à-dire avec la déformation des roches qui les contiennent.

L'évolution des traces dans ce site, depuis le moment de leur formation jusqu'à nos jours, nous amène à la conclusion que la recherche d'ichnopoïètes dans les traces d'un site est un processus qui doit s'accompagner de l'analyse des structures qui accompagnent les empreintes et la fiabilité de la surface que nous analysons. Il n'est pas strictement nécessaire que les empreintes soient des "estampes" (Requeta *et al.* [2006-2007]; "stamp" en langue anglaise, Brown, [1999]), ni même qu'elles soient de véritables empreintes (cf. Masrour *et al.*, 2025), mais il faut connaître exactement les limites de chacune de ces structures.

L'association des empreintes ABL à des ichnopoïètes spécifiques est actuellement impossible car elle ne dépend pas essentiellement des ichnopoïètes qui les ont marquées mais des processus qui les ont modifiées.

8. REMERCIEMENTS

Surtout aux élèves des courses d'été des Universités de Rabat (Maroc) et de La Rioja (Espagne) par son travail de nettoyage restauration et préparation du gissement pour sa reproduction graphique. Nous sommes également très reconnaissants aux habitants d'une maison proche du site qui nous ont apporté du thé et du beurre tous les matins. Finalement à Ch Meyer pour sa révision et commentaires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALEXANDER, R.M. (1976). Estimates of speed of dinosaurs. *Nature*, 261, 129-130
- BOUTAKIOUT, M., HADRI, H., NOURI, J., DÍAZ-MARTÍNEZ, I. y PÉREZ-LORENTE, F. (2008). Prospecciones paleontológicas en el sinclinal de Iouaridâne (Alto Atlas, Marruecos). Cuantificación de yacimientos y de icnitas. *Geogaceta*, 45: 51-54.
- BROWN, T. (1999). *The science and art of tracking*. Berkley Books. 219 p.
- CASANOVAS, M.L., FERNANDEZ, A., PEREZ-LORENTE, F. y SANTAFÉ, J.V. (1989). Huellas de dinosaurios de La Rioja. Yacimientos de Valdecevilla, La Senoba y de la Virgen del Campo". I.E.R. *Ciencias de la Tierra*, 12, 190 p.
- DEMATHEIU, G. (1986). Nouvelles recherches sur la vitesse des vertébrés, auteurs de traces fossiles. *Geobios*, 19, 327-333.
- DU DRESNAY, R. (1979). Sédiments Jurassique du domaine des chaînes atlasiques du Maroc. Symposium. Sédimentation Jurassique européen Paris 1977, *Association des Sédimentologistes Français, Publication spéciale* 1, 345-365.
- DUBAR, G. et MOUTERDE, R. (1978). Les formations à ammonites du Lias Moyen dans le Haut Atlas de Midelt et du Tadla. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*. 274, 77 p.

- FALKINGHAM, P.L. and 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. DOI 10.1073/pnas.1416252111.
- FORNÓS, J. J., BROMLEY, R.G., CLEMMENSEN, L. B. and RODRÍGUEZ-PÉREZ, A. (2002). Tracks and trackways of *Myotragus balearicus* Bate (Artiodactyla, Caprinae) in Pleistocene aeolianites from Mallorca (Balearic Islands, Western Mediterranean). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 180, 277-313.
- GAND, G., DEMATHIEU, G., et MONTENAT, CH. (2007). Les traces de pas d'anphibiens, de dinosaures et autres reptiles du Mésozoïque français: Inventaire et interprétations. *Palaeovertebrata*, 1-4, 1-149.
- GARCÍA-RAMOS, J.C., PIÑUELA, L. y LIRES, J. (2002). Icnitas de dinosaurios, tipos de sedimentos y consistencia del sustrato. *Congreso internacional sobre dinosaurios y otros reptiles mesozoicos en España*, Pérez-Lorente, F. coord. Resúmenes. p. 25-26.
- GATESY, S.M. (2003). Direct and indirect tracks features: what sediment did a dinosaur touch? *Ichnos*. 10, 91-98.
- GATESY, S.M., and FALKINGHAM, P.L. (2020). Hitchcock's leptodactyls, penetrative tracks and dinosaur footprint diversity. *Journal of vertebrate Paleontology* <https://doi.org/10.1080/02724634.2020.1781142>
- HADRI, M. y PÉREZ-LORENTE, F. (2012). Historia de yacimientos con huellas de dinosaurio, desde su descubrimiento hasta su primer estudio. Alrededores de El Mers (Marruecos). *Zubia*, 30, 93-140.
- HAUBOLD, H. (1971). *Ichnia amphibiorum et reptiliorum fossilium*. In *Handbuch der Paläoherpetologie*. Ed. O. Kuhn, 18,18, 124 p.
- ISHIGAKI, S. (1986). Dinosaur footprints from Atlas Mountains *Nature Study*. 32(1):6-9, Osaka City Museum of Natural History, Osaka, Japan (in Japanese).
- ISHIGAKI, S. (1988). Les empreintes de Dinosaures du Jurassique inférieur du Haut-Atlas central marocain. *Notes du Service Géologique du Maroc*, 44, 334, 79-86.
- ISHIGAKI, S. and LOCKLEY, M.G. (2010). Didactyl, tridactyl and tetradactyl theropod trackways from the Lower Jurassic of Morocco: evidence of limping, labouring and other irregular gaits. *Historical Biology*. 22, 100-108.
- JENNY, J. et JOSSEN, J.A. (1982). Découverte d'empreintes de pas de Dinosauriens dans le Jurassique inférieur (Pliensbachien) du Haut-Atlas central (Maroc). *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences de Paris*. 294, 223-226.
- JENNY, J. (1985). Carte Géologique du Maroc au 1:100.000, feuille Azilal. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 339 p.
- JENNY, J. (1988). Carte géologique du Maroc au 1/100 000, feuille Azilal (Haut Atlas central), Mémoire explicatif. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*. 339 bis, p. 104.
- KUBAN, G.J. (1989). Elongate dinosaur tracks, In *Dinosaur Tracks and Traces*, D.D.Gillette y M.G.Lockley eds. Cambridge University Press, 57-72
- LEONARDI, G. (ed). (1987). *Glosary and Manual of Tetrapod Footprint Palaeoichnology*. Departamento Nacional da produção mineral., Brasilia. 75 pp.
- MASROUR, M., BOUTAKIOUT, M., HERRERO GASCÓN, J., OCHOA MARTÍNEZ, R., SÁINZ RUIZ DE ZUAZU, J.L., TORCIDA-FERNÁNDEZ, F. and PÉREZ-LORENTE, F. (2025). The uncertain representativeness of theropod footprint morphometric data. *Journal of African Earth Sciences* 229 <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2025.105676>
- MASROUR, M., BOUTAKIOUT, M., MINGUEZ CENICEROS, J., ROLLAND, T. and PÉREZ-LORENTE, F. (2023). Morphometric and biomorphic variability of theropod footprint characters from Imilchil tracksites (Mid?-Late Jurassic, Central High Atlas, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 207 et al. DOI :10.1016/j.jafrearsci.2023.105048
- MELERO, M. y PÉREZ-LORENTE, F. (2011). Huellas en las obras. Reconocimiento y estudio de huellas fósiles de dinosaurio en la presa de Enciso (La Rioja, España). *Zubia*, 29, 31-60

- MINGUEZ CENICEROS, J., MASROUR, M., BOUTAKIOUT, M., EXTREMIANA, J. and PÉREZ-LORENTE, F. (2024). Analysis of very-small theropod footprints data from Imilchil tracksite (High Central Atlas, Morocco). A concordance model for a global scale. *Journal of African Earth Sciences* 219. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105389>
- PÉREZ-LORENTE, F. (1993). Dinosaurios plantígrados en La Rioja. *Zubía monográfico*.5, 181-228.
- PÉREZ-LORENTE, F. (2001). *Paleoicnología. Los dinosaurios y sus huellas en La Rioja*. Fundación Patrimonio Paleontológico de La Rioja. 227 pp.
- PÉREZ-LORENTE, F. (2015). *Dinosaur footprints and trackways of La Rioja*. Life of the past, J.O.Farlow ed. Indiana University Press.363 pp.
- REQUETA, L.E., HERNÁNDEZ MEDRANO, N. y PÉREZ-LORENTE, F. (2006-2007). La Pellejera: Descripción y aportaciones. Heterocronía y variabilidad de un yacimientos con huellas de dinosaurio de La Rioja (España). *Zubía monográfico*, 18-19, 21-114.
- ROCH, E. (1939). Description géologique des montagnes a l'Est de Marrakech. *Mémoire du Service Mines et Carte Géologique du Maroc*. 51.
- ROMERO, M.M., PÉREZ-LORENTE, F. y RIVAS, P. (2003). Análisis de la parataxonomía utilizada con las huellas de dinosaurio. En *Dinosaurios y otros reptiles mesozoicos de España*. F. Pérez-Lorente coord. Ciencias de La Tierra. 26, 13-32.
- SEPTFONTAINE, M. (1986). Milieux de dépôts et foraminifères(Lituolidés) de la plate-forme carbonate du Lias moyen au Maroc. *Revue de Micropaleontology*. 28:268–289.
- THULBORN, R.A. (1990). *Dinosaur Tracks*, Chapman and Hall. 1-410.
- THULBORN, R.A. and WADE, M. (1989). A footprint as a history of movement. En *Dinosaurs Tracks and Traces* D.D.Gillette y M.G.Lockley eds. Cambridge Univ. Press. 51-56.

