

Origine, processus de formation et évolution des mardelles du Nord-Est du Bassin Parisien (France)

Vincent Ollive^{1,2,*}, Julian Wiethold^{2,3}, Thierry Klag² et Philippe Klag²

¹ EA 7304 Loterr, Université de Lorraine, Campus Lettres et Sciences Humaines, 23 boulevards Albert 1er, BP 60446, 54001 Nancy Cedex, France

² Inrap Grand-Est Nord, Centre Archéologique de Metz, 12 rue Méric, 57050 Metz, France

³ UMR 6298 ArTeHis Bâtiment Sciences Gabriel, 6 Boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

Reçu le 11 mars 2020 / Accepté le 17 décembre 2020 / Publishing online: 4 May 2021

Résumé – Plusieurs milliers de dépressions fermées circulaires ou « mardelles » sont observées sur les marnes du Keuper du Nord-est du Bassin Parisien. Leur origine anthropique ou naturelle est largement débattue depuis la première moitié du XIX^e siècle par archéologues et naturalistes. Dans le cadre des recherches archéologiques préalables à la construction de la LGV-Est Européenne, sept d'entre elles ont été fouillées afin de répondre aux questions liées à leur origine, leur processus de formation, et à l'évolution de leur comblement sédimentaire. Une nouvelle méthodologie associant géoarchéologie, archéobotanique et archéologie a conduit à la réalisation de longues et profondes tranchées à la pelle mécanique. Pour la première fois, l'observation directe à la fois du substratum géologique et du comblement sédimentaire a été réalisée. Cela a permis de mettre en évidence les processus suivants conduisant à une formation naturelle des dépressions : (1) des déformations (fractures) affectent les marnes du Keuper ; (2) des conduits sont formés au niveau de ces déformations et permettent le soutirage des produits issus de l'altération des marnes ; (3) lorsque la dépression est formée, l'effondrement/ glissement des bordures conduit à l'atténuation de la morphologie initiale des mardelles ; (4) l'enregistrement sédimentaire témoigne d'un environnement local influencé par l'évolution forestière et l'utilisation du sol. Les observations directes à l'échelle de chaque dépression complètent les informations spatiales issues d'un relevé Lidar le long de la LGV-Est Européenne. L'analyse de ce relevé met en évidence des alignements de dépressions dont les orientations sont similaires à celles du réseau de drainage et dont l'origine est probablement liée à la fracturation des marnes du Keuper. Enfin, même si un processus de formation naturelle est envisagé, un rôle de l'activité humaine dans l'initiation du processus pourrait être envisagé notamment par l'action sur l'évolution du couvert végétal et donc dans la karstogenèse des marnes.

Mots clés : Bassin Parisien / carpologie / dépressions fermées / géomorphologie / géoarchéologie / Karst

Abstract – Origin, formation processes and evolution of closed depressions of the North-Eastern Paris Basin (France). Thousands of sub-circular closed depressions or “mardelles” are observed on Keuper marls of the North-eastern Paris Basin. Their anthropogenic or geological origin is highly debated by archaeologists and naturalists since the first half of the 19th century. During rescue archaeological excavations along the high-speed train line “LGV-Est Européenne” seven closed sub-circular depressions were investigated to resolve the question of their origin, their formation processes and their evolution of their sedimentary filling. To that goal, a new field methodological approach combining geoarchaeology, archaeobotany and archaeology was carried out by the optimization of mechanical excavator. The realisation of long and deep trenches allowed direct observations of both substratum and sedimentary filling. This study evidences the natural origin of closed depressions by the play of the following processes: (1) Initiation of closed depressions is realised by ancient fractures affecting the Triassic marls; (2) Deepening of closed depressions is realised by alteration of superficial marls and residual clays passage down several wells formed through existing faults; (3) When the closed depression exists, the modifications of the shape of the closed depression's edges, is due to degradation of marl blocks; (4) The following sedimentary filling traduces environmental conditions influenced by forest evolution and land use changes since Antiquity.

*Auteur correspondant : vincent.ollive@gmail.com

Direct observations at the scale of closed depression complete spatial information from a Lidar survey along the LGV-Est line. The analysis of this survey shows alignments of closed depressions with orientations similar to those of the drainage system, the origin of which is probably linked to the fracturing of the Keuper marls. Finally, even if a process of natural formation is envisaged, a role of human activity in the initiation of the process could be envisaged in particular by the action on the evolution of the land use (plant cover) and thus in the marls karstogenesis.

Keywords: Paris Basin / archaeobotany / closed depressions / geomorphology / geoarchaeology / Karst

1 Introduction

Dans la partie nord-est du Bassin Parisien, sur les marnes du Keuper, des milliers de dépressions fermées sub-circulaires ou « mardelles » sont connues à la fois dans les prés, les champs et sous couvert forestier (Wichmann, 1903 ; Thoen et Herault, 2006). Ces éléments morphogènes très fréquents caractéristiques du paysage lorrain ont des diamètres compris entre 1 m et près de 100 m. Depuis plus de 150 ans, la question portant sur leur origine anthropique ou naturelle suscite un vif intérêt et de multiples interprétations contradictoires au sein des communautés d'archéologues et de naturalistes (Bach, 1866 ; Colbus, 1902, 1905, 1913 ; Welter, 1903, 1908, 1920, 1921, 1923 ; Desforges, 1908 ; Defontaine et Guyot, 1922 ; Linkenheld, 1927, 1928 ; Härbele, 1928 ; Delafosse *et al.*, 1932 ; Bellard, 1935, 1960 ; Bellard *et al.*, 1945). La très importante présence humaine attestée dès la Protohistoire et la découverte d'artéfacts archéologiques dans certains comblements a conduit à rechercher une fonction particulière à ces dépressions (carrières d'extraction de matériaux, habitats...). À partir du milieu du 20^e siècle, l'hypothèse d'une formation naturelle liée au karst du gypse dans les marnes du Keuper réussit à constituer un consensus dans la communauté scientifique pendant plus de 60 ans (Delafosse, 1948 ; Coûteaux, 1969 ; Nicod, 1976, 1993, 1994, 1995, 2002).

Depuis quelques années, en Lorraine et ailleurs en Europe, les questions concernant l'origine et l'évolution des dépressions fermées sont à nouveau abordées avec des études pluridisciplinaires associant parfois pédologie, palynologie, chimie et géophysique (Otto et Hofle, 1994 ; Colling et Reichling, 1996 ; Pissart, 2003 ; Gillijns *et al.*, 2005 ; Mauz 2007 ; Ruffaldi *et al.*, 2007 ; Vanwalleghe *et al.*, 2008 ; Goepp *et al.*, 2010 ; Etienne, 2011 ; Etienne *et al.*, 2010, 2011, 2013 ; Kołodyńska-Gawrysiak et Poesen, 2017 ; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2019). Cependant, malgré la diversité des méthodes employées au cours des 150 dernières années, aucune observation directe du substratum géologique n'a été réalisée afin de tester l'existence d'un éventuel lien avec l'origine et le processus de formation des mardelles.

Le présent article présente les principaux résultats obtenus par les fouilles archéologiques conduites sur sept mardelles le long du tracé LGV-Est Européen en Lorraine. Les objectifs étaient d'apporter de nouveaux éléments pour définitivement caractériser leur origine, leur processus de formation et l'évolution de leur enregistrement sédimentaire. Pour y répondre, une démarche inédite associant géoarchéologie, archéobotanique et archéologie a été mise en œuvre. Une nouvelle méthodologie a été engagée par la réalisation de

fouilles et de coupes profondes et dépassant largement les limites des mardelles. Elle a permis une observation directe à la fois du substratum et du comblement sédimentaire.

2 Le secteur d'étude

2.1 Le cadre géomorphologique et géologique

Les dépressions fermées (mardelles) étudiées sont localisées sur les communes de Belles-Forêts, Haut-Clocher et Loudrefing au cœur du massif forestier du parc naturel régional de Lorraine le long du tracé LGV-Est (France, 57) (Fig. 1). Ce secteur du Nord-est du Bassin Parisien est caractérisé par la présence de formations géologiques marneuses datant du Keuper, les « marnes irisées inférieures » (Trias supérieur), dont l'épaisseur atteint environ 200 m (Bourquin et Guillocheau, 1996 ; BRGM, 1968 ; Bourquin *et al.*, 2002). Ces marnes salifères et gypseuses de couleurs variées montrent des variations de faciès avec des intercalations de bancs dolomitiques centimétriques à décimétriques. La présence d'évaporites (sel et gypse) au sein des marnes a donné le nom de « Saulnois » à cette région, berceau d'une importante exploitation de sel connu sous le nom de « briquetage de la Seille » depuis le Néolithique et dont le paroxysme est atteint à l'Antiquité entre le second Âge du Fer et l'Époque Romaine (Olivier, 2001, 2003 ; Olivier et Kovacik, 2006).

Du point de vue structural, la grande ondulation du synclinal de Sarreguemines située au sud de l'anticlinal de Lorraine/Pont-à-Mousson affecte les terrains du Secondaire (Le Roux, 1999, 2000). À l'échelle régionale les terrains du Jurassique et du Trias sont également affectés par des fracturations orientées NW-SE et NE-SW. Dans les marnes du Keuper de nature tendre, cette fracturation est peu documentée car difficile à cartographier.

Les ondulations topographiques de crêtes et de vallons successifs délimitent des bassins versants étroits aux altitudes comprises entre 200 m et 300 m NGF (Fig. 1). Les nombreux petits cours d'eau contribuent aux bassins versants de la Sarre à l'Est et de la Seille à l'Ouest tous deux affluents de la Moselle. Leurs orientations sont souvent proches de N-S, NE-SW et NW-SE. En raison de la présence quasi-exclusive de marnes, les pentes sont douces. Le relevé topographique à haute résolution (Lidar (*Light Detection and Ranging*)) réalisé en 2008 par Réseau Ferré de France le long du tracé LGV-Est et large d'un kilomètre permet la détection de centaines de mardelles sous forêt, dans les champs cultivés et les prairies (Tab. 1) (Georges-Leroy, 2011, 2020). Leur densité élevée (entre 20 et 40 km²) est variable en fonction de leur position topographique, la détection étant plus favorable en sommet de

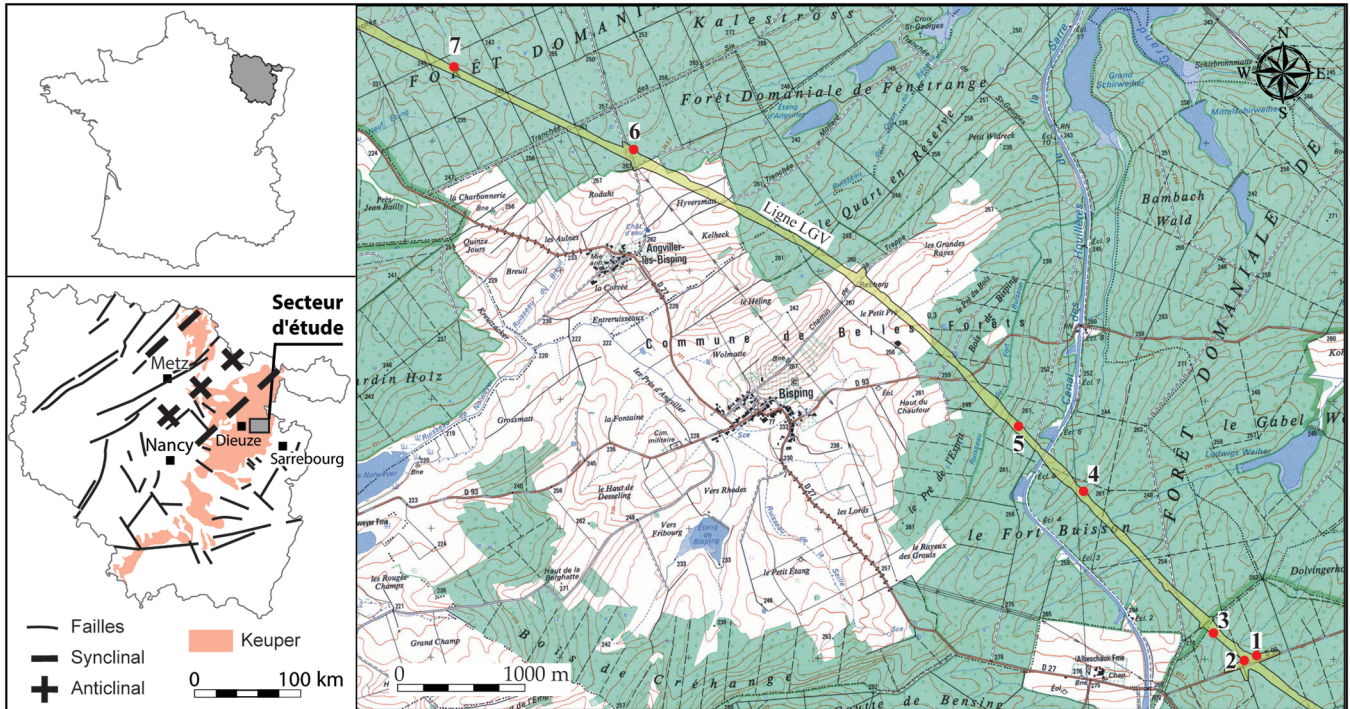


Fig. 1. Localisation des mardelles étudiées le long du tracé LGV-Est Européenne (Moselle, France). Fond cartographique IGN 1/25 000.

Tableau 1. Caractéristique du relevé LiDAR acquis le long de la LGV-Est (Georges-Leroy, 2020).

Secteur	Commanditaire	Date de vol	Surface (dont forêt) (km ²)	Hauteur de vol (m)	Angle de scan (°)	Densité moy. émise (pts/m ²)	Densité moy. point sol (pts/m ²)	Résolution MNT (m)
LGV Est-partie mosellane (57)	RFF	Février–mars 2008	102 (22)	/	/	8	2,4 (forêt) 3,9 (hors forêt)	0,25

versant lorsque le comblement est incomplet. Du point de vue morphologique, les mardelles documentées dans le même secteur ou plus largement dans l'Est du Bassin Parisien, ont des formes circulaires, des bords redressés et un fond assez plan (Colin et Godard, 1962 ; Klag, 1990 ; Barth et al., 1996 ; Klag et Dolata, 1998 ; Slotboom, 1963 ; Barth et al., 1996 ; Etienne, 2011 ; Etienne et al., 2011). Les alignements mis en évidence présentent des orientations préférentielles comparables à celle du réseau de drainage local dont les anomalies de tracé « en baïonnette » visibles pourraient être attribuables à la fracturation des marnes (Fig. 2).

2.2 L'occupation humaine

L'occupation humaine régionale est documentée par des prospections (pédestres et aériennes), des diagnostics et fouilles archéologiques (Klag et al., 2015 ; Ollive et al., 2016), par la documentation historique (cartes anciennes et textes) ainsi que par le relevé Lidar réalisé par Réseau Ferré de France notamment sous couvert forestier (Georges-Leroy, 2011, 2020). Le néolithique est essentiellement documenté de façon indirecte par la palynologie (Ruffaldi, 1999). L'occupation est particulièrement marquée par l'activité du « briquetage

de la Seille » dès la fin de l'Âge du Bronze quelques kilomètres à l'ouest et par le développement de l'agriculture à l'Âge du Fer et à l'Époque romaine qui ont eu un impact majeur et durable sur le couvert forestier et sur l'érosion des sols des versants marneux locaux (Riddiford et al., 2012 ; Gebhardt et al., 2014 ; Jusseret et al., 2015 ; Riddiford et al., 2016). Ce développement antique est suivi, dès le Moyen-Âge, par une diminution des activités agricoles et saunières associées à une réduction de l'habitat, permettant le retour de la forêt sur les zones hautes (Ruffaldi et al., 2007 ; Etienne, 2011 ; Etienne et al., 2010, 2011, 2013). La carte des Naudin atteste de l'existence d'un couvert forestier depuis au moins le XVIII^e siècle (Wagner, 2003 ; Etienne, 2011). Les fouilles archéologiques ont montré que l'utilisation pour différents usages ou encore la simple fréquentation des mardelles s'est réalisé à toutes les époques (Klag et al., 2015).

3 Matériel et méthode

3.1 La méthodologie de terrain

Les mardelles fouillées, se répartissent du Nord au Sud le long du tracé LGV-Est à proximité de nombreuses autres dépressions ayant fait l'objet d'études précédentes (Ruffaldi

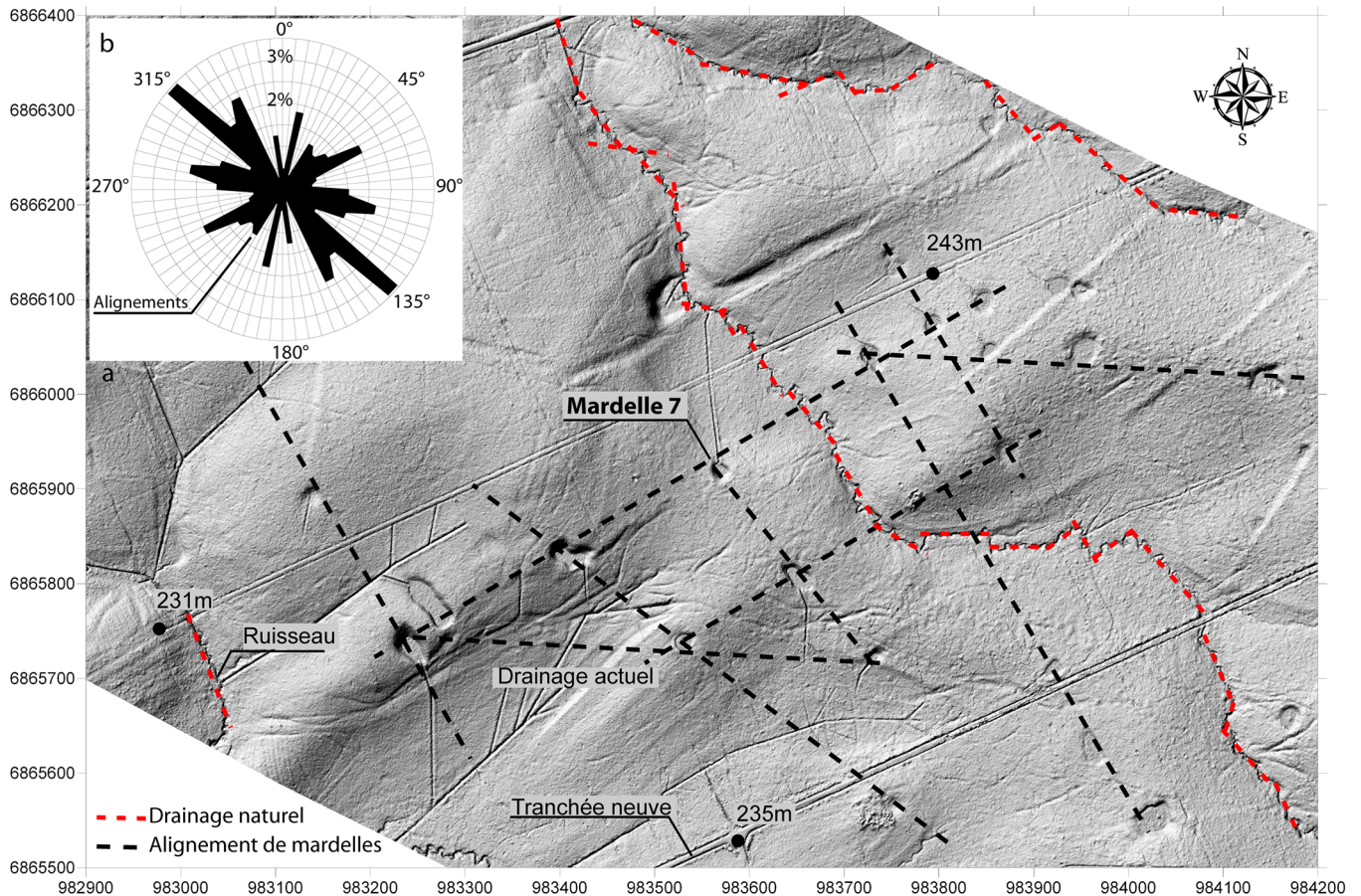


Fig. 2. (a) Vue en relief ombrée du relevé Lidar à proximité de la mardelle 7 (Réseau Ferré de France). (b) Les alignements de mardelles (graphe en haut à gauche) sont similaires aux orientations du réseau de drainage naturel.

et al., 2007 ; Etienne, 2011 ; Etienne *et al.*, 2010, 2011, 2013). Elles étaient toutes situées en forêt et présentaient des diamètres supérieurs à 15 m et des profondeurs atteignant environ 4 m, jusqu'à 6 m pour la mardelle 6.

Pour chaque dépression, une grande coupe débordante et profonde de plusieurs mètres a été réalisée afin de permettre des observations directes des marnes du Keuper et du comblement sédimentaire. Les coupes ont été réalisées dans le sens de la pente afin de favoriser la lecture conjointe des dépôts gravitaires, lacustres, palustres, ou issus de la dynamique de versant. L'utilisation d'une pelle mécanique a permis d'entendre l'observation du substratum géologique à une profondeur de près d'un mètre sous l'interface substrat/comblement (fond) des mardelles. Près d'un tiers du temps de travail de terrain a été consacré au nettoyage complet des coupes pour une observation de la stratigraphie et des déformations du substratum. Chaque coupe a fait l'objet d'un relevé photographique et d'un relevé papier regroupant les observations. Le positionnement et le recalage altimétrique ont été réalisés à l'aide d'un GPS différentiel (Trimble®) de précision centimétrique.

3.2 Analyse et caractérisation des dépôts

La description des dépôts sur le terrain et les analyses réalisées en laboratoire ont conduit à la caractérisation (1) de la stratigraphie (nature des contacts, géométrie des couches, traits

pédologiques) et (2) de faciès distincts à partir de critères sédimentologiques (granulométrie, présence de matière organique, réaction à l'acide chlorhydrique) pour retracer les conditions de dépôt dans les dépressions en lien avec leur environnement (Tab. 2).

Deux des mardelles étudiées (mardelles 3 et 5) ont fait l'objet de prélèvements en colonnes pour l'étude des macrorestes végétaux (J. Wiethold in Klag *et al.*, 2015) et l'étude palynologique (D. Etienne in Klag *et al.*, 2015). Au total, 14 prélèvements pour la mardelle 5 et 15 prélèvements pour la mardelle 3 ont été analysés pour préciser les cortèges végétaux (Tab. 3). Un tamisage total a été effectué avec une colonne de tamis de 1 mm, 0,5 mm et 0,315 mm. Des feuilles entières ou fragmentées ont été récupérées manuellement avant tamisage. Le tri et les déterminations ont été réalisés à l'aide d'un stéréomicroscope Olympus SZ40 (grossissements 7x à 40x) et d'un microscope Olympus BX51. La détermination a été réalisée à partir de la collection de référence du centre archéologique Inrap de Metz, d'ouvrages d'archéobotanique (Jacomet *et* Kreuz, 1999) ou portant sur les milieux naturels (par exemple : Beijerinck, 1947 ; Rabien, 1953 ; Brouwer *et* Stählin, 1955 ; Berggren, 1964, 1981 ; Körber-Grohne, 1964, 1991 ; Grosse-Brauckmann, 1972, 1974 ; Katz *et al.*, 1977 ; Birks, 1980 ; Tomlinson, 1985 ; Anderberg, 1994 ; Cappars *et al.*, 2006 ; Mauquoy *et* Van Geel, 2007 ; Mauquoy *et al.*, 2010). La nomenclature utilisée se conforme à celle de la flore de

Tableau 2. Caractéristiques des faciès sédimentaires et leurs occurrences chronologiques.

Phase	Faciès	Type	Description	Contact basal	Géométrie des dépôts	Granulométrie	CaCO ₃	Éléments organiques	Interprétation de mise en place
5	O3	Organique	Dépôts organiques peu décomposés, état actuel sous forêt	Non érosif	Horizontal	Débris végétaux	Non carbonaté	Origine autochtone et allochtone	Débris végétaux peu décomposés
4B	OM	Organo-minéral	Dépôts mixtes, colluvions et matière organique autochtone	Non érosif	Horizontal à sigmoïde	Argiles et limons	Non carbonaté	Origine autochtone ou absents	Colluvions et matière organique autochtone
4B	M3	Minéral	Dépôts mal triés, essentiellement fins, colluvions non à faiblement carbonaté	Parfois érosif	Sigmoïde	Limons et argiles (> 60 %), sables fins à grossiers (30–40%)	Carbonaté/Non carbonaté	Absents	Colluvions
4A	O2	Organique	Dépôts organiques à débris de bois et feuilles déposés en lits horizontaux	Non érosif	Horizontal	Débris végétaux	Non carbonaté	Origine autochtone et allochtone	Couche de débris organiques
3	O1	Organique	Dépôts fins organiques, argilo-limoneux non carbonatés, restes végétaux	Non érosif	Horizontal	Argiles et limons	Non carbonaté	Origine autochtone	Gyttja détritique
2	M2	Minéral	Dépôts fins argilo-limoneux finement sableux, non carbonatés	Non érosif	Horizontal	Limons et argiles (> 80 %), finement sableux (10–20 %)	Non carbonaté	Absents ou autochtones	Dépôts lacustre (Gyttja argileuse)
1, 2	M1	Minéral	Dépôts directement hérités du substrat à fragments grossiers marneux	Erosif, concave sur les bordures		Blocs, pierres, granules/matrice fine limono-argileuse non carbonatée	Carbonaté	Absents	Glissement ou effondrement des parois

Lambinon et Verloove (2012). Les interprétations écologiques se basent sur les publications d'Ellenberg *et al.* (1991), Oberdorfer (1992, 2001) Gueidan et Trémolières (2003), Bettinger (2010), et de la Commission Européenne (European Commission, 1999, 2007).

3.3 La datation des dépôts

La datation des dépôts a été réalisée à partir d'éléments de mobilier archéologique (céramique, métallique, organique) et de 66 échantillons de bois analysés par dendrochronologie. Parmi ces bois, 36 échantillons de chêne et deux de hêtre ont pu être datés (W. Tegel in Klag *et al.*, 2015). Outre la date fournie par les derniers cernes, ces bois permettent également de documenter les dates minimales de colonisation forestière au voisinage des dépressions. Sept échantillons prélevés dans les dépressions 3 et 5 ont fait l'objet d'analyses radiocarbone au laboratoire de datation de Poznań (T. Goslar in Klag *et al.*, 2015). Elles ont toutes été effectuées sur des macrorestes végétaux d'origine terrestre, pour la majorité des akènes de charme (*Carpinus betulus*). La calibration effectuée avec le logiciel OxCal (Ramsey, 1995) repose sur les données Intcal09 (Reimer *et al.*, 2009). Ces datations fournissent un « terminus

ante-quem » pour la formation des dépressions, et permettent de rattacher leur dynamique de comblement au cadre environnemental régional (Tab. 4 et 5).

4 Résultats

4.1 La fracturation et l'altération des marnes du Keuper

Les terrains du Keuper correspondent à des marnes de faciès variés dont les alternances de lithologie, les changements de couleur jaunâtre, rougeâtre et grisâtre et la finesse des couches dolomitiques constituent des marqueurs pour l'observation des déformations. Dans chaque secteur, ces marnes sont affectées par des déformations telles que des fractures et failles (mardelles 1, 2, 3, 4, 5, 6) ou des plis (mardelle 7) antérieures à la formation des dépressions. Les figures 3 et 4 présentent les coupes interprétées respectivement des mardelles 4 et 5. La figure 5 montrent que les failles sont normales de faible rejet (quelques centimètres). Au niveau de ces déformations (fractures et failles essentiellement), à quelques centimètres à dizaines de centimètres en profondeur de l'interface substrat/comblement (fond), les marnes montrent un changement d'état, plus hydraté et décarbonaté, et de

Tableau 3. Synthèse simplifiée des résultats des analyses carpologiques.

Mardelle	Phase	US	Profondeur (cm)	Taxa	Interprétation
3	5	10	170–178	Laïche espacée	Appauvrissement du milieu
	4	9	182–190	<i>Sphagnum palustre</i> et laïches	
		8	194–202 206–214	Chêne à feuilles caduques, hêtre, charme, bouleau verruqueux. laïche à bec, laïche espacée, laïche allongée, <i>Sphagnum palustre</i>	Milieu forestier, la mardelle est en eau, développement d'une tourbière à sphaignes et laïches
	3	7	218–226 230–238 242–250 254–262 266–274	Chêne à feuilles caduques, hêtre, charme, bouleau verruqueux, <i>Sphagnum palustre</i> , laïches (<i>Carex remota</i> , <i>Carex paniculata</i> /C. <i>appropinquata</i> , <i>Carex rostrata</i> , <i>Carex vulpina</i>). Association du Magnocaricion (<i>Carex paniculata</i> /C. <i>appropinquata</i> et <i>Scirpus sylvaticus</i>), rubanier nageant, aulne glutineux	
	2	5–6	278–286 290–298 302–310 314–322 326–334	Potamot nageant, chêne à feuilles caduques, hêtre, charme, bouleau verruqueux, peuplier tremble, laïche à bec (<i>Carex rostrata</i>), aulne, mousses (<i>Aulacomnium</i>), aulne glutineux, saules (<i>Salix</i> sp.)	Milieu forestier, mardelle boisée et marécageuse, l'aulnaie se développe Mardelle en eau, la forêt progresse
		3	340–348	Characées (Genre <i>Chara</i>), lentilles d'eau (<i>Lemna</i> sp.), potamot nageant, scirpe de bois (<i>Scirpus sylvaticus</i>), scirpe des marais (<i>Eleocharis palustris</i> l.s.), massette (<i>Typha</i> sp.), renoncule rampante (<i>Ranunculus repens</i>), brunelle commune (<i>Brunella vulgaris</i>), plantain à larges feuilles (<i>Plantago major</i>), pourpier (<i>Portulaca oleracea</i>), grande ortie (<i>Urtica dioica</i>)	Milieu ouvert. mardelle en eau et ensoleillée, impact humain faible
5	4	16	264–272 276–282 286–292 296–304	Chêne à feuilles caduques, charme, hêtre, laïches (<i>Carex paniculata</i> /C. <i>appropinquata</i> , <i>Carex rostrata</i> , <i>Carex elongata</i> , <i>Carex</i> cf. <i>vesicaria</i>), aulne glutineux, mousses marécageuses (<i>Aulacomnium palustre</i>)	Milieu boisé, la mardelle s'assèche et l'aulnaie regagne du terrain Les laïches dominant, le sol est couvert par des mousses, quelques aulnes
		12	308–316 320–328	<i>Sphagnum palustre</i> , laïche allongée (<i>Carex elongata</i>)	Développement d'une tourbière mésotrophique
	3	11	332–348 352–360 368–376 380–388 392–400 404–412	Potamot nageant, nénuphar blanc, hêtre (<i>Fagus sylvatica</i>), chêne à feuilles caduques, charme, aulne glutineux (<i>Alnus glutinosa</i>), bouleau verruqueux, <i>Oenanthe phellandre</i> ou fenouil aquatique (<i>Oenanthe aquatica</i>), <i>Sphagnum palustre</i> , mousses brunes, laïches (<i>Carex paniculata</i> /C. <i>appropinquata</i>)	Milieu forestier, zone marécageuse dominée par des mousses, des laïches, aulnes, saules Milieu forestier, mardelle en eau, plantes aquatiques flottantes, bordures boisées
		8	416–424	Nénuphar blanc (<i>Nymphaea alba</i>), potamot nageant (<i>Potamogeton natans</i>), chêne à feuilles caduques (<i>Quercus</i> sp., probablement <i>Quercus robur</i>), peuplier (<i>Populus</i> cf. <i>tremula</i>), charme (<i>Carpinus betulus</i>)	Milieu forestier, mardelle en eau
		7	426–432	Peu de restes végétaux, chêne à feuilles caduques, bouleau (<i>Betula</i> sp. sect. <i>alba</i> , <i>Betula pendula</i>), mousses (autres que sphaignes)	Milieu ouvert

Tableau 4. Dates radiocarbone par accélérateur calibrées avec le Programme OxCal à partir de la courbe de calibration Intcal09.

Mardelle	Echantillon	Profondeur (cm)	Phase	Date radiocarbone (^{14}C yr BP)	Date calibrée à 2 σ (cal yr AD)
5	Poz-57783	304–296	4 A	880 $\pm$ 25	[1045;1220]
5	Poz-57782	360–352	4 A	1115 $\pm$ 25	[885;989]
5	Poz-57781	458	2	1680 $\pm$ 30	[258;425]
3	Poz-57787	274–266	4 A	1170 $\pm$ 25	[776;952]
3	Poz-57785	286–278	3	1245 $\pm$ 30	[682;870]
3	Poz-57784	334–326	3	1635 $\pm$ 25	[345;533]
3	Poz-37838	352–354	2	1870 $\pm$ 70	[1;337]

couleur qui contraste avec le reste des coupes et montre l'altération chimique locale (Fig. 5–7).

Le fond des dépressions correspond à une surface d'érosion irrégulière qui présente souvent une pente générale faible (< 5 %) et dont l'orientation ne tient pas compte du pendage naturel des couches. Lorsque des anomalies topographiques du fond sont observées, elles se trouvent fréquemment à la verticale de déformations affectant les marnes et visibles en profondeur (Fig. 3 et 4). En effet, au sein des marnes, un passage depuis un état altéré (hydraté et décarbonaté) vers un état sain est observable sur une profondeur atteignant parfois 50 cm (Fig. 5–7). L'association verticale entre l'anomalie de surface, l'altération et la fracturation montre l'existence de conduits de soutirage permettant le passage des éléments issus de l'altération des marnes.

4.2 L'enregistrement sédimentaire et botanique des mardelles

Une fois la dépression formée par soutirage, l'évolution de l'enregistrement sédimentaire et carpologique des mardelles connaît cinq phases principales. Les changements de faciès traduisent l'évolution de la dynamique de dépôt (glissement, effondrement, colluvionnement, sédimentation lacustre ou palustre) en lien avec la dynamique du paysage local (ouverture et fermeture du milieu) et l'évolution de la végétation locale.

4.2.1 Phase 1 : Glissement et effondrement des parois

Dans toutes les mardelles, la première phase de comblement correspond à l'effondrement ou au glissement des parois latérales (Fig. 3, 4 et 6). Ces instabilités gravitaires sont souvent associées à la présence de fractures et conduisent à l'atténuation de la morphologie initiale des dépressions peu de temps après leur formation. Les dépôts peuvent présenter un contact basal concave à proximité des bordures puis sub-horizontale vers le centre. Leur épaisseur diminue rapidement vers le centre des dépressions sur une distance de quelques mètres. Le faciès (M1) associé à ces dépôts est directement dérivé du substratum géologique local. On retrouve des éléments grossiers (granules, pierres, blocs) de marne peu altérée qui conservent la stratification d'origine, inclus dans une matrice fine issue de l'altération des marnes. Ces éléments fins mal triés, essentiellement limoneux et argileux, non carbonatés, où la matière organique est absente composent également le remplissage des fractures affectant le substratum

(Fig. 6). Ces observations attestent du passage en profondeur des produits de l'altération des marnes à la faveur des fractures, failles ou plis.

4.2.2 Phase 2 : Développement d'un environnement lacustre

La phase 2 correspond à la mise en eau des dépressions après leur formation. L'environnement est favorable au développement d'une végétation aquatique et s'inscrit dans un paysage ouvert déboisé probablement dominé par les prés et pâturages. Pour la mardelle 3, cette phase est attribuable à l'Antiquité, d'après une datation radiocarbone pour la partie sommitale de ces dépôts (1-337 cal. AD à deux sigma).

Les blocs situés sur les bordures sont d'abord affectés par une altération (décarbonatation) et une érosion qui conduit à l'atténuation de la topographie de la dépression. Des dépôts peu différenciés (faciès M1) et localisés essentiellement sur les bordures se mettent en place et scellent les dépôts précédents. Latéralement, vers le centre de la dépression, les dépôts passent à un faciès plus fin (M2) et conduisent au colmatage quasi-continu du fond (Fig. 3 et 4). Ce deuxième faciès M2 (Gyttja argileuse) est attribué à des dépôts horizontaux fins limono-argileux finement sableux, non carbonatés et dont l'épaisseur vers le centre des dépressions avoisine 40 cm. La mise en place de ces dépôts traduit l'imperméabilisation du fond des dépressions et l'évolution vers un environnement lacustre.

Les restes de plantes aquatiques et de zones humides (oogones de characées, algues submergées d'eaux douces ou légèrement salées) sont présents (Tab. 3). Les taxons aquatiques reconnus sont par exemple les lentilles d'eau (*Lemna* sp.), le potamot nageant et une espèce de renoncule aquatique. Les bords de la dépression ensoleillée ne sont pas entourés d'arbres et la lame d'eau était égale ou supérieure à 1 m. Les herbacées sont toutes caractéristiques de zones humides ou de pâtures fraîches : scirpe de bois (*Scirpus sylvaticus*), scirpe des marais (*Eleocharis palustris* Ls.), massette (*Typha* sp.), renoncule rampante (*Ranunculus repens*), prunelle commune (*Prunella vulgaris*). Le plantain à larges feuilles (*Plantago major*), le pourpier (*Portulaca oleracea*) et la grande ortie (*Urtica dioica*) témoignent de perturbations possibles par l'homme et le bétail.

4.2.3 Phase 3 : Augmentation de la teneur en matière organique

Les dépôts horizontaux deviennent ensuite plus organiques (faciès O1, Gyttja détritique) et traduisent un environnement en milieu ouvert qui devient progressivement forestier

Tableau 5. Datations dendrochronologiques obtenues pour des bois trouvés dans les mardelles (W. Tegel, Dendronet, Bohlingen, Allemagne).

Mardelle	Phase	Echantillon	Taxa	Nbre cernes	Date du premier cerne	Date du dernier cerne	Datation AD
6	4	B11b	Chêne	160	946	1105	1115 ± 10
6	4	B11objet	Chêne	122	383	504	après 514
6	4	B11 bois4	Chêne	149	250	398	après 408
5	4	B41St1_pl1	Chêne	337	567	903	après 913
5	4	B41-B9	Chêne	262	641	902	921 ± 10
5	4	B41_tab	Chêne	134	729	862	après 872
5	4	B41-177	Chêne	89	747	835	850 ± 10
5	4	B41ST1_pl2	Chêne	205	570	774	après 784
5	4	B41b	Hêtre	211	463	646	après 676
5	3	B41 ech4	Chêne	105	373	477	496 ± 10
5	3	B41 20	Chêne	92	384	475	après 485
5	3	B41 ech15	Chêne	99	332	430	449 ± 10
5	3	B41 ech1	Chêne	78	352	429	après 439
5	3	B41 ech05	Chêne	81	348	428	443 ± 10
5	3	B41 ech11	Chêne	64	364	427	après 437
5	3	B41 ech10	Chêne	104	284	387	printemps 387
5	3	B41-159	Chêne	34	300	333	333
5	3	B41-179	Chêne	46	288	333	333
5	3	B41-P11	Chêne	49	285	333	333
5	3	B41-P30	Chêne	49	284	332	336 ± 10
5	3	B41-178	Chêne	42	290	331	336 ± 10
5	3	B41-P62	Chêne	50	282	331	345 ± 10
3	3	H2 bois2	Chêne	159	360	518	518
3	3	H2 ech3	Chêne	178	289	466	après 476
3	3	H2 bois7	Chêne	158	294	451	après 461
3	3	H2B1	Chêne	146	283	428	après 438
3	3	H2 ech10	Chêne	100	288	387	printemps 387
3	3	H2 ech10 r2	Chêne	108	280	387	385 ± 10
3	3	H2 ech10 r4	Chêne	102	286	387	387
3	3	H2 ech10a	Chêne	97	291	387	printemps 387
3	3	H2	Chêne	108	279	386	386
3	3	H2 ech10 r1	Chêne	109	278	386	printemps 386
1	3	H8, ech2	Chêne	149	286	434	453 ± 10
7	4	L3 bois4	Chêne	163	720	882	après 892
7	4	L3 bois3	Chêne	152	702	853	861 ± 10
7	4	L3 bois2	Chêne	101	707	807	après 817
7	4	L3 bois1	Chêne	87	711	797	après 807

(Fig. 3–5). Cette installation d’une forêt mixte se produit au cours de l’Antiquité tardive. Pour la mardelle 3, le début de cette phase s’inscrit dans une fourchette chronologique allant du IV^e jusqu’au début VI^e s. après J.-C. (Poz-57784). La fin de cette phase est attribuable autour de la fin du VII^e jusqu’à la fin du IX^e siècle après J.-C. (Poz-57785). Pour la mardelle 5, des traces d’aménagements datés par dendrochronologie à 333 AD, 336 ± 10 AD et 345 ± 10 AD permettent d’attribuer à la fin de l’Antiquité cette phase sédimentaire. Dans les mardelles 3, 4 et 6, la présence d’artefacts archéologiques (céramiques, pierres, objets en bois, et aménagements en bois) atteste d’une fréquentation pendant l’Antiquité et au Moyen-Âge et pourraient être interprétées comme des traces d’activités variées (bucheronnage, apiculture, chasse).

Localement, les dépôts peuvent être affectés par des déformations (convolutions) interprétables comme des figures de charge dus à la mise en place de dépôts postérieurs (Fig. 3). Le spectre carpologique de la mardelle 3 atteste de l’abondance d’une végétation aquatique flottante formée par des potamots. Les écailles de bourgeons de chêne à feuilles caduques (*Quercus* sp.), de hêtre (*Fagus sylvatica*) et de charmes (*Carpinus betulus*) témoignent du rapprochement de la lisière d’une forêt mixte à feuilles caduques (Tab. 3). Des aulnes glutineux (*Alnus glutinosa*) s’installent en bordure de la dépression tandis que les diaspores d’herbacées disparaissent. Progressivement, le spectre carpologique évolue avec le maintien du caractère aquatique (potamot nageant) et l’augmentation du caractère forestier. Les nombreux restes de

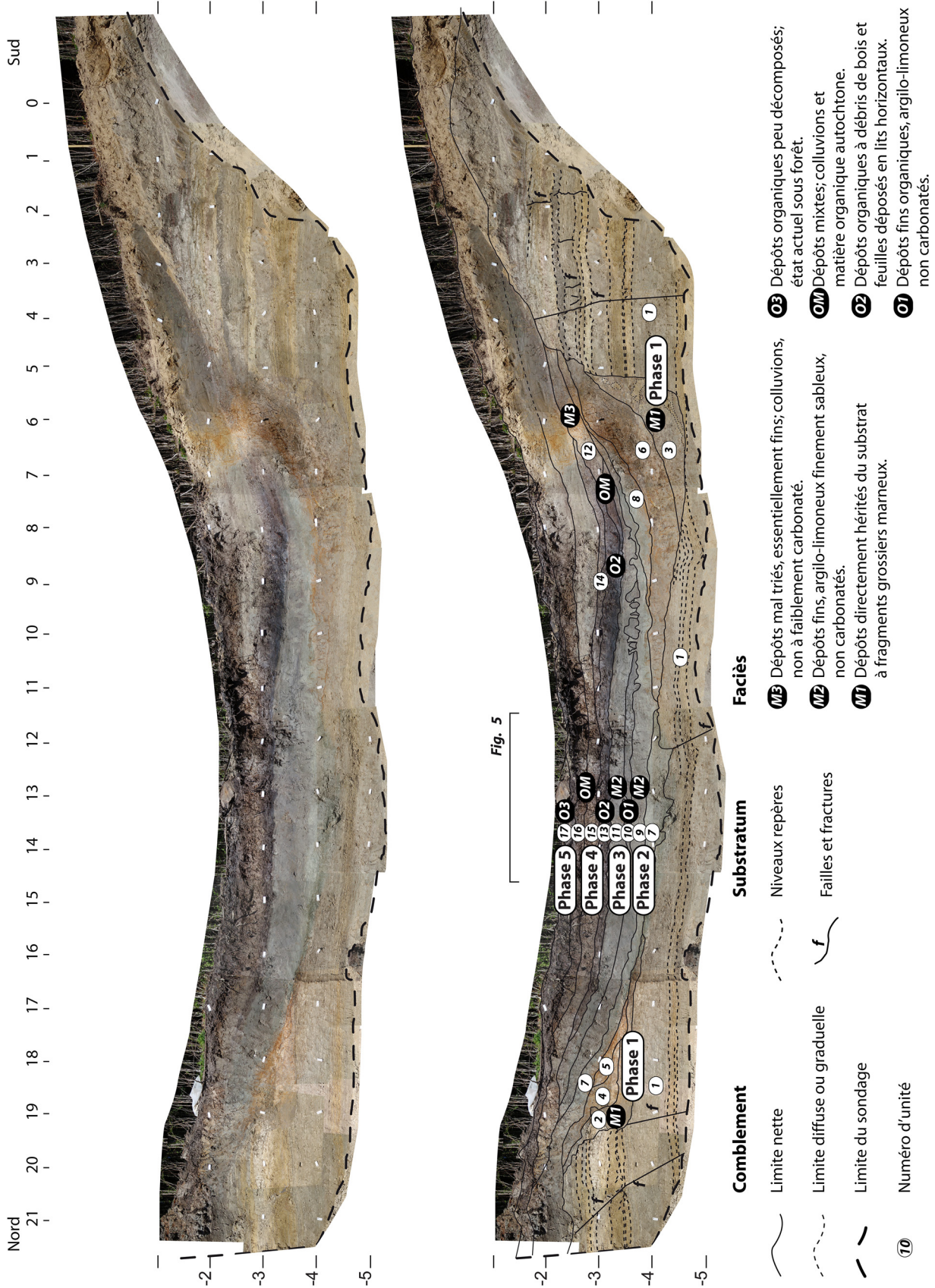


Fig. 3. Relevé photographique et coupe interprétée de la mardelle 4. La succession des faciès et la variation des faciès au cours du temps permettent la mise en évidence de 5 phases principales de comblement de la dépression.

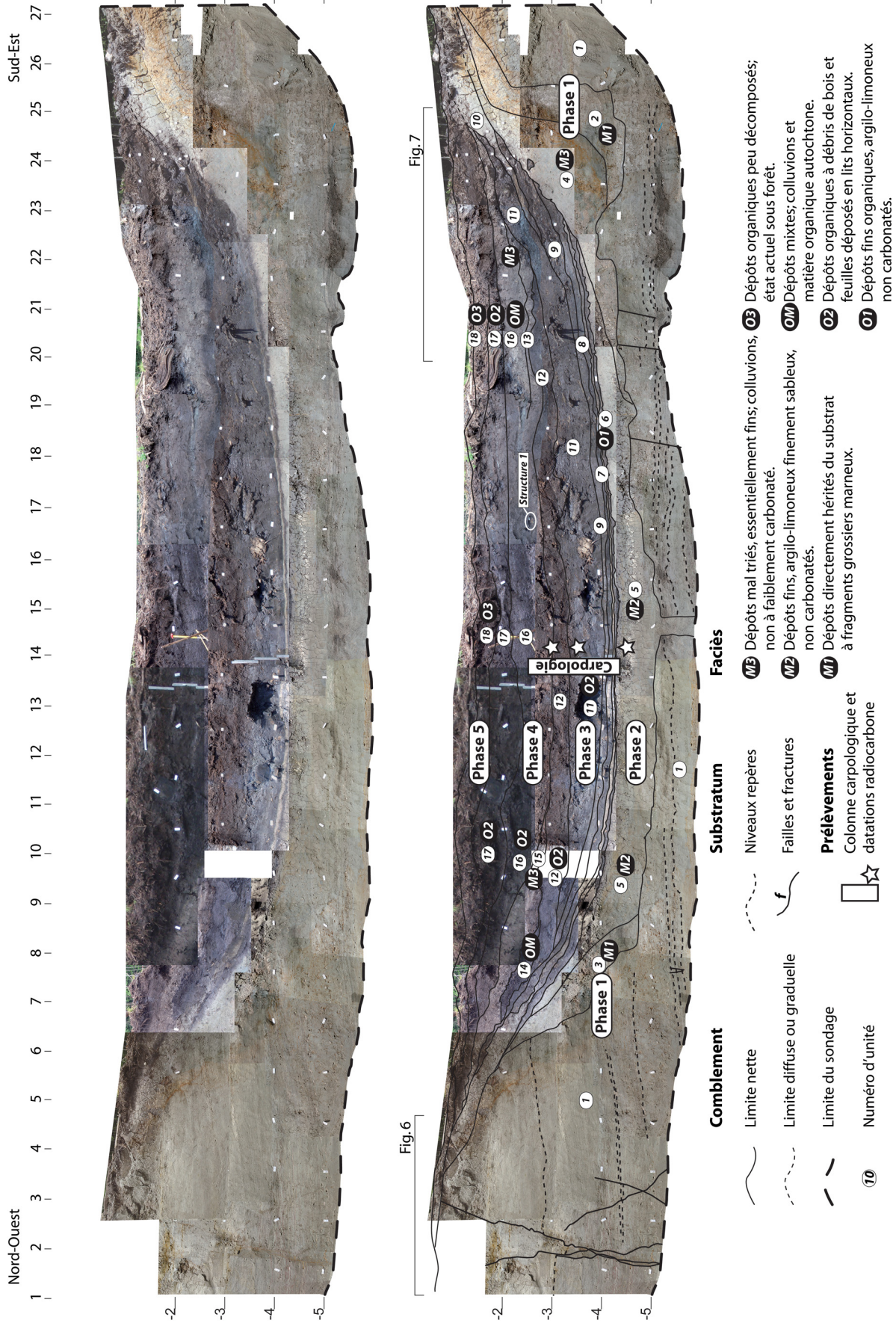


Fig. 4. Relevé photographique et coupe interprétée de la mardelle 5. La succession des faciès au cours du temps permettent la mise en évidence de 5 phases principales de comblement de la dépression.

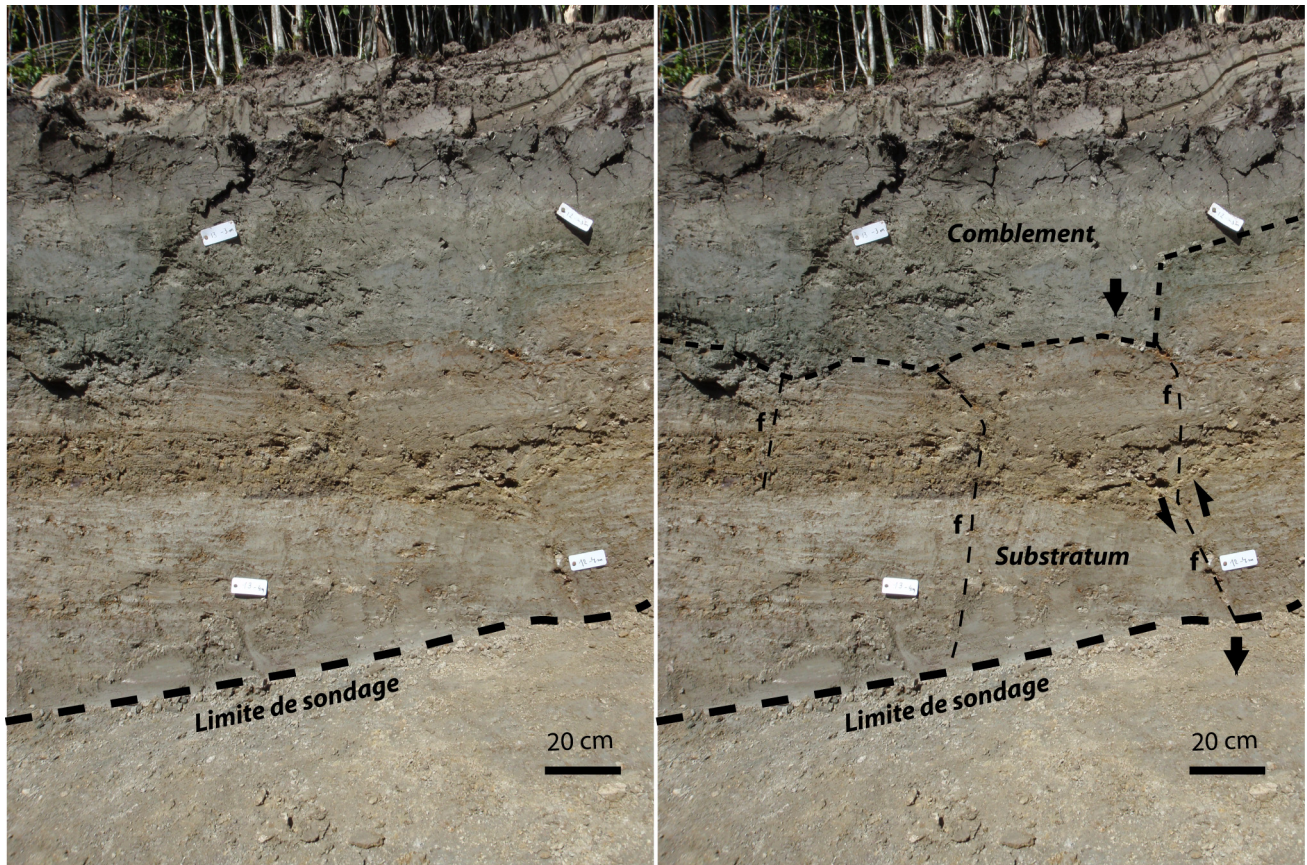


Fig. 5. Vue photographique montrant le lien entre la fracturation des marnes et les anomalies topographiques du fond de la mardelle 4.

bouleau verruqueux (*Betula pendula*) et de peuplier tremble (*Populus* cf. *tremula*) traduisent l'installation du stade pionnier forestier.

4.2.4 Phase 4-A: Le développement forestier et la mise en place de tourbières

Autour des mardelles humides, le caractère forestier devient prépondérant. Pour la mardelle 3, cette transformation en bas-marais survient au haut Moyen-Âge, très probablement durant l'époque carolingienne (fin VIII^e–fin X^e siècle) (Poz-57787). Pour la mardelle 5, cette phase est datée autour de 885-989 cal. AD à deux sigma et se poursuit aux alentours 1045-1220 cal. AD à deux sigma (Tab. 4). Un bois en réemploi a fourni une date d'abattage postérieure à 913 AD (Tab. 5). Pour la mardelle 7, cette phase est datée plus tardivement autour du IX^e s. après J.-C. d'après les bois datés par dendrochronologie (Tab. 5).

Les dépôts (faciès O2) sont presque exclusivement composés de particules d'origine végétale allochtones (brindilles, bois couchés, feuilles déposées à plat) ou autochtones (sphaignes, vase organique). Les macro-restes végétaux attestent d'abord du développement forestier avec la disparition progressive des espèces pionnières comme le bouleau et le peuplier (*Betula pendula* et *Populus tremula*) et l'apparition des mousses. Les nombreux restes d'aulne glutineux traduisent une réduction de la surface d'eau ouverte dans la dépression. La réduction puis la disparition de l'eau ouverte dans les mardelles

s'accompagne du développement d'une zone marécageuse où s'implante une aulnaie ainsi que les herbacées comme la laïche allongée (*Carex elongata*).

La dynamique sédimentaire d'abord dominée par l'accumulation de débris végétaux sous couvert forestier évolue ensuite vers le développement de bas-marais tourbeux. Le milieu devient favorable au développement de tourbes à sphaignes et/ou de tourbes à racinelles qui se succèdent dans le temps. L'installation de plaques de sphaignes correspond à une légère acidification et à l'appauvrissement du milieu et est associé à la réduction de l'aulnaie et à une réduction de l'influence de la forêt mixte. Les tourbes à racinelles correspondent principalement au développement des laïches (*Carex elongata*, *Carex paniculata*/C. *appropinquata*, *Carex rostrata*, *Carex vulpina*) et du scirpe de bois (*Scirpus sylvaticus*) et s'accompagnent de la disparition totale de diaspores de plantes aquatiques. Les mousses brunes des zones marécageuses participent également de manière importante à la formation de la tourbe. La présence de *Carex rostrata* témoigne d'une végétation inondée en permanence sous 30–60 cm d'eau.

4.2.5 Phase 4-B: Ouvertures épisodiques du milieu et activité agricole

Au cours de la phase 4, correspondant à une période de tourbification dans un environnement forestier, les

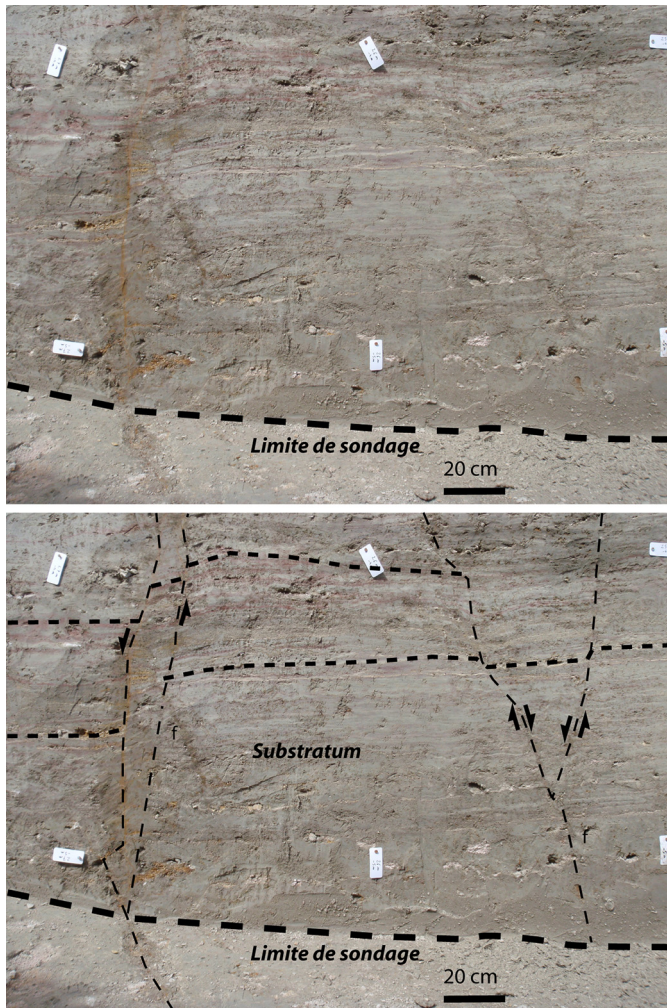


Fig. 6. Vue photographique et vue interprétée montrant la fracturation affectant les marnes de la mardelle 5.

enregistrements sédimentaires indiquent également l'occurrence d'épisodes de reprise du colluvionnement (Fig. 3 et 4). Ces épisodes sont essentiellement enregistrés sur les bordures des dépressions par la mise en place de dépôts minéraux sablo-limoneux appartenant au faciès M3. Lorsque ces dépôts atteignent le centre des dépressions, un changement de faciès (faciès OM) correspond à l'enrichissement des dépôts colluviaux en matière organique dans un environnement humide (limons et sables riches en fragments ligneux et mousses peu décomposés). Ces apports minéraux conduisent au comblement quasi-complet des dépressions et peuvent être à l'origine de figures de charge affectant les dépôts sous-jacents.

Ce changement sédimentaire est probablement lié à la reprise d'une dynamique d'érosion des versants pouvant être dues à des activités humaines telles que l'agriculture. L'augmentation de cet impact anthropique nettement marqué sur les dépôts sédimentaires n'est pas visible dans les spectres carpologiques, ce qui pourrait indiquer que les cultures ne se trouvent pas dans les environs immédiats des mardelles.

4.2.6 Phase 5 : La forêt actuelle

La fin du comblement sédimentaire correspond à l'environnement actuel sous couvert forestier qui a été reconnu avant les fouilles (faciès O3). Sur les bords des mardelles, on pouvait trouver l'aulne glutineux, quelques chênes pédonculés et les saules tandis qu'à l'extérieur, le peuplement correspondait à la forêt mixte à feuilles caduques du plateau lorrain, composée de hêtres, chênes pédonculés, charmes et peupliers.

5 Discussion

5.1 Origine et processus de formation naturels des mardelles

La réalisation de coupes larges et profondes a rendu possible l'observation directe du substratum et du comblement des sept mardelles. L'origine des mardelles est associée aux déformations qui affectent les marnes du Keuper et à la formation de conduits permettant le soutirage des produits d'altération des marnes (argiles et limons résiduels). Les failles ou plis observées sur les coupes peuvent être liées à l'héritage tectonique ou à la déstabilisation des terrains causée par une dissolution en profondeur (Pierre *et al.*, 2017). À une échelle spatiale plus large, le rôle de la fracturation du substratum est mis en évidence par les alignements de mardelles détectés sur le relevé Lidar dont les orientations sont proches celles du réseau de drainage naturel local. La structuration très particulière de l'extrémité du Nord-Est du Bassin de Paris, mais peu documentée dans les marnes du Keuper, influence donc probablement à la fois l'organisation du réseau de drainage naturel et la répartition de formes morphogénétiques kartistiques originales que sont les mardelles.

Il s'agit donc d'un processus karstique se produisant sur des terrains peu carbonatés et non d'un creusement anthropique ou d'une formation périglaciaire. Ces résultats sont en accord avec la description classique des marnes du Keuper « terrain de prédilection des mardelles » où le processus de suffosion ou soutirage est lié à la dissolution des évaporites (sel et gypse) en profondeur (Gamez 1985 ; Losson 2003).

Ces observations n'avaient jusque-là pas été possibles dans le cadre d'études réalisées par forages ou tranchées peu profondes et focalisées sur l'étude des comblements et sans observation détaillée du substratum géologique (Ruffaldi *et al.*, 2007 ; Goepp *et al.*, 2010 ; Etienne, 2011 ; Etienne *et al.*, 2010, 2011, 2013). Jusqu'à présent, toutes les mardelles étudiées dans l'Est du Bassin Parisien présentent les mêmes caractéristiques morphologiques (formes circulaires, bords redressés, topographie du fond) (Colin et Godard, 1962 ; Klag, 1990 ; Barth *et al.*, 1996 ; Klag et Dolata, 1998 ; Slotboom, 1963 ; Barth *et al.*, 1996 ; Etienne, 2011 ; Etienne *et al.*, 2011). Une origine naturelle devrait donc être également envisagée pour toutes ces dépressions.

5.2 Un forçage anthropique d'un processus naturel ?

Parmi les milliers de mardelles observées sur le plateau lorrain, seules quelques-unes ont fait l'objet de datations (« terminus ante-quem »). Une majorité semble pouvoir être



Fig. 7. Mosaïque photographique de la mardelle 5 montrant l'altération et la déformation des marnes attestant leur soutirage en profondeur.

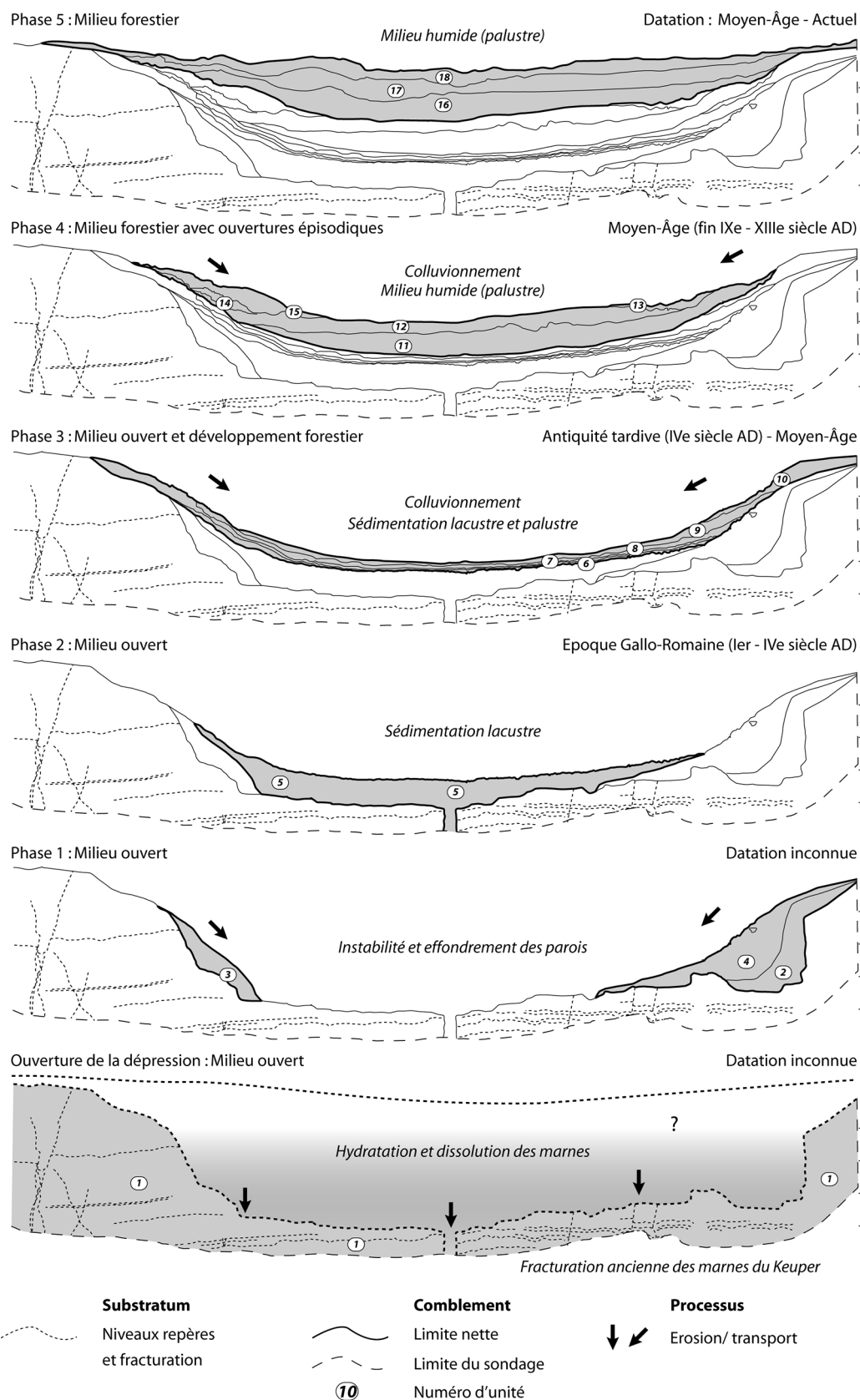


Fig. 8. Reconstitution de l'évolution de la mardelle 5 d'après les données stratigraphiques, sédimentologique et carpologique.

rattachée aux époques antique et médiévale (Ruffaldi *et al.*, 2007 ; Goepp *et al.*, 2010 ; Etienne, 2011 ; Etienne *et al.*, 2010, 2011, 2013). Les plus anciennes mardelles, de dimension supérieure à 100 m de diamètre, se sont formées antérieurement à 4500±35 BP (Poz-34251 ; calibré à deux sigma 3354-3090 cal. BC) et 4480±40 BP (Poz-34250 ; calibré à deux sigma 3348-3026 cal. BC) alors que les plus récentes, quant à elles, se forment encore de nos jours (Etienne, 2011 ; Ollive *et al.*, 2016). La datation de la base des comblements fréquemment, mais pas exclusivement, attribuée à l'Antiquité et au Moyen-Âge, la proximité de structures archéologiques ou la présence de mobilier, ne constituent pas, selon nous, des critères suffisants pour attester d'une formation anthropique.

Même si l'origine et le processus de formation des mardelles sont naturels, la surreprésentation des mardelles en cours de comblement aux époques antique et médiévale suggère le lien possible avec des modifications environnementales majeures survenues à des périodes antérieures. Jusqu'à présent, les enregistrements sédimentaires, polliniques et botaniques des mardelles attestent de l'existence d'un milieu ouvert dominé par la prairie postérieurement à leur formation (Ruffaldi *et al.*, 2007 ; Etienne, 2011 ; Etienne *et al.*, 2011, 2013 ; Etienne in Klag *et al.*, 2015).

Les données palynologiques régionales montrent que l'ouverture du milieu survenue dès le Néolithique (Ruffaldi, 1999) a été considérablement accentuée à partir de l'époque protohistorique pour atteindre un paroxysme au cours de l'époque romaine (Riddiford *et al.*, 2012, 2016). En effet, une intense déforestation a été nécessaire pour l'exploitation du sel (le briquetage de la Seille) autour de Marsal quelques kilomètres plus en aval dans le bassin de la Seille ainsi que pour le développement de l'agriculture. À l'époque antique, l'occupation et l'agriculture régionale se sont largement développées comme l'attestent les traces parcellaires visibles sur le relevé Lidar (Georges-Leroy, 2011) ce qui a entraîné une augmentation de l'érosion des versants (Gebhardt *et al.*, 2014 ; Ollive *et al.*, 2016). À l'échelle des bassins versants, la réduction du couvert forestier et de l'évapotranspiration, l'altération du drainage et l'augmentation initiale de l'érosion des versants ont probablement conduit à des changements du bilan hydrologique. Ces changements ont pu constituer, à une échelle de temps courte, un forçage pour l'altération des marnes et la dissolution du sel et du gypse présents en profondeur et jouer un rôle majeur dans la karstogenèse locale et régionale. Cela pourrait suggérer qu'un seuil de déstabilisation de l'environnement a été atteint permettant une accélération de l'altération chimique.

Un rôle modulateur du climat, notamment les variations d'humidité documentées dès la protohistoire dans le Nord-Est de la France (Büntgen *et al.*, 2011 ; McCormick *et al.*, 2012 ; Tegel *et al.*, 2011) peut également être envisagé pour expliquer l'existence de cette phase de karstogenèse.

La réalisation de nombreuses datations, étendues à d'autres sous bassins versants, permettrait probablement de distinguer plusieurs phases de formations et d'établir un calendrier spatialisé de l'anthropisation du plateau lorrain (déforestation, altération du drainage) qui ne peut pas être seulement documenté par l'archéologie. Cette donnée chronologique pourrait permettre de comprendre la cinétique du processus morphogénétique d'altération affectant les marnes du Keuper.

5.3 La dynamique sédimentaire et végétale du comblement

La documentation de la dynamique de comblement des mardelles fouillées permet d'attester que la première phase du comblement correspond toujours à l'effondrement/ glissement des bordures qui pourtant n'avait jamais encore été identifiée (Fig. 8). Jusqu'à présent, l'absence de mobilier et de restes organiques, ne permet pas de fournir une datation fiable à cette phase précoce. Le colmatage du fond et le développement d'un environnement lacustre n'intervient que dans un second temps (Fig. 8).

La dynamique de comblement est ensuite directement liée à (1) la présence d'eau libre et (2) l'évolution du couvert végétal dans et à proximité des dépressions. L'utilisation et l'aménagement des mardelles est attesté de manière ponctuelle et les indicateurs de perturbations restent faibles ou quasi absents. Le milieu initialement lacustre dans un environnement ouvert au cours de l'Antiquité devient progressivement propice au développement d'une tourbière à la fin de l'Antiquité et à l'époque médiévale alors qu'une progression de la forêt mixte est documentée, entrecoupée par des phases d'érosion du sol liées à des mises en cultures ponctuelles. Cette observation rejoint les résultats palynologiques acquis dans le secteur (Ruffaldi *et al.*, 2007 ; Etienne, 2011 ; Etienne *et al.*, 2013). L'initiation de ce retour forestier coïncide avec la « période de migration » entre ~250 et 550 AD bien documentée pour le Nord-Est de la France correspondant à une période de troubles et à une augmentation de l'humidité (Büntgen *et al.*, 2011).

6 Conclusion

Après 150 ans de débats, la fouille de sept mardelles du plateau lorrain a permis pour la première fois d'observer directement le substratum et les comblements sédimentaires. Ces conditions sont indispensables pour discuter de leur origine, du processus de formation et de leur évolution sédimentaire et botanique. L'origine naturelle des mardelles est liée à l'altération des marnes du Keuper et à la formation de conduits à la faveur des déformations qui l'affectent (fracturation et plis). Ces conduits permettent le soutirage des particules résiduelles issues de l'altération. L'origine karstique mise en jeu dans la genèse des dépressions fermées dans les terrains argileux, constitue une spécificité des mardelles lorraines.

Si la formation des mardelles est attestée pour d'autres époques, le nombre important de comblements antiques ou médiévaux et donc postérieurs aux changements environnementaux majeurs d'origine anthropique permet de suggérer l'existence d'un impact anthropique indirect sur leur formation. L'exploitation du sel et le développement de l'agriculture (déforestation intensive, diminution de l'évapotranspiration, érosion des versants et modification du drainage) ont probablement conduit à accentuer/favoriser la karstogenèse des marnes du Keuper riches en sel et en gypse. Les mardelles du plateau lorrain constituent donc des éléments morphogénétiques qui mettent en évidence un impact anthropique majeur sur l'érosion chimique à l'échelle régionale.

Plus que des vestiges archéologiques, les mardelles, doivent être considérées comme des archives paléo-environnementales de l'évolution du paysage lorrain. Les études futures, par le croisement des disciplines (géomorphologie, palynologie, carpologie, xylologie...) nous permettront d'obtenir une vision plus juste des interactions entre l'homme et son environnement durant les derniers milliers d'années.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier M. Georges-Leroy (SRA Lorraine), Réseau Ferré de France (RFF), W. Tegel, D. Etienne, D. Harmand, C. Petit, ainsi qu'A. Quiquerez et A. Devos pour leur aide, leurs encouragements et leurs remarques.

Références

- Anderberg A-L. 1994. Atlas of seeds and small fruits of Northwest European plant species with morphological descriptions. Part 4 Resedaceae-Umbelliferae. Stockholm: Swedish Museum of Natural History.
- Bach J. 1866. Mémoire sur les habitations gauloises. *Mémoires de la Société d'Histoire et d'Archéologie de la Moselle* 8: 83–95.
- Barth B, Schneider C, Schneider T, Eisinger D, Didion A, Royar H. 1996. Les mardelles en Sarre et en Lorraine. Nancy: O.N.F., Direction Régionale de Lorraine.
- Beijerinck W. 1947. Zadenatlas der Nederlandsche Flora ten behoeve van de botanie, palaeontologie, bodemcultuur en warenkennis. Wageningen: fac-similé Amsterdam: Backhuis and Meesters (1976).
- Bellard A. 1935. Deuxième Contribution à la Préhistoire de Lorraine. *Bulletin de la Société Préhistorique de France* 34: 101–166.
- Bellard A. 1960. À propos des mardelles de Lorraine. *Bulletin de la Société préhistorique de France* 57(3-4): 140–141.
- Bellard A, Delafosse W, Guyot H. 1945. La question des mardelles en Moselle. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Moselle* 3: 89–102.
- Berggren G. 1964. Atlas of Seeds and small fruits of Northwest-European Plant species with morphological descriptions (Sweden, Norway, Denmark, East Fennoscandia and Iceland). Part 2. Cyperaceae. Stockholm: Swedish Natural Science Research Council.
- Berggren G. 1981. Atlas of Seeds and small fruits of Northwest-European Plant species with morphological descriptions. Part 3. Salicaceae-Cruciferae. Stockholm: Swedish Museum for Natural History.
- Bettinger A. 2010. Die Vegetation des Saarlandes. Landsweiler-Reden: Zentrum für Biodokumentation, Stabsstelle des Landesamtes für Umwelt und Arbeitsschutz des Saarlandes (LUA) (ZfB-Scriptum – Veröffentlichungen des Zentrums für Biodokumentation 3).
- Birks HH. 1980. Plant macrofossils in Quaternary lake sediments (*Archiv für Hydrobiologie – Advances in Limnology* 15). Stuttgart: E Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Bourquin S, Guillocheau F. 1996. Keuper stratigraphic cycles in the Paris Basin and comparison with cycles in other Peritethyan basins (German Basin and Bresse-Jura Basin). *Sedimentary Geology* 105: 159–182.
- Bourquin S, Robin C, Guillocheau F, Gaulier JM. 2002. Three-dimensional accommodation analysis of the Keuper of the Paris Basin: discrimination between tectonics, eustasy, and sediment supply in the stratigraphic record. *Mar. Petrol. Geol.* 19: 469–498.
- BRGM. 1968. Carte géologique de la France au 1/50000e, Sarrebourg, Feuille XXXVI-15. Service de la carte géologique de la France. Paris: BRGM (Guillaume M, Limasset JC).
- Brouwer W, Stählin A. 1955. Handbuch der Samenkunde für Landwirtschaft, Gartenbau und Forstwirtschaft. Frankfurt a. Main: DLG-Verlags-GmbH.
- Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, et al. 2011. 2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility. *Science* 331: 578–582.
- Cappers RTJ, Bekker RM, Jans JEA. 2006. Digitale Zadenatlas van Nederland (*Groningen Archaeological Studies* 4). Groningen: Barkhuis Publishing & Groningen University Library.
- Colbus E. 1902. Rapport de fouilles. *Annuaire de la Société Préhistorique de France*.
- Colbus E. 1905. Neue Untersuchungen von Maren und der danebenliegenden Tumuli. *Jahrbuch des Gesellschaft für lothringische Geschichte und Altertumskunde* 17(2): 236–271.
- Colbus E. 1913. Die Maren oder Grubenwohnungen. In: Keune J-B, Bour R, Ruppel A, eds. *Lothringen und seine Hauptstadt*. Festschrift zur 60. Generalversammlung der Katholiken Deutschlands in Metz 1913. Metz: Lothringer Verlags-und Hilfsverein, pp. 60–66.
- Colin G, Godard A. 1962. Les dépressions fermées en Lorraine. *Revue Géographique de l'Est* 3: 261–263.
- Colling G, Reichling L. 1996. Notes floristiques 1994–1995. *Bulletin de la Société des Naturalistes Luxembourgeois* 97: 25–38.
- Coûteaux M. 1969. Recherches palynologiques en Gaume, au Pays d'Arion, en Ardenne Méridionale (Luxembourg Belge) et au Gutland (Grand Duché du Luxembourg). *Acta Geographica Lovaniensa* 8: 193.
- Defontaine MM, Guyot H. 1922. Les mardelles de Lorraine. *Revue Anthropologique* 32: 359–362.
- Delafosse W. 1948. De l'origine des mardelles de Lorraine. *Extrait des Mémoires de l'Académie Nationale de Metz* 11(17): 24.
- Delafosse W, Guyot H, Bellard A. 1932. La question des mardelles en Moselle. *Bulletin de la Société d'histoire naturelle de Moselle* 20: 89–97.
- Desforges A. 1908. A propos des mardelles. *Bulletin de la Société Préhistorique de France* 5(8): 391–395.
- Ellenberg H, Weber HE, Düll R, Wirth V, Werner W, Paulissen D. 1991. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa (*Scripta Geobotanica* 18). Göttingen: Erich Goltze KG.
- Etienne D. 2011. Les mardelles intra-forestières de Lorraine: origines, archives paléo-environnementales, évolutions dynamiques et gestion conservatoire. Thèse de doctorat, Université de Nancy-I/INRA.
- Etienne D, Ruffaldi P, Ritz F, Dambrine E. 2010. Etude des variations de la végétation d'un massif forestier de la plaine lorraine (Moselle, France) depuis le Moyen-âge. *Quaternaire* 21: 317–323.
- Etienne D, Ruffaldi P, Dupouey JL, et al. 2011. The origin of closed depressions in Northeastern France: A new assessment. *Geomorphology* 126: 121–131.
- Etienne D, Ruffaldi P, Georges-Leroy M, Ritz F, Dambrine E. 2013. Searching for ancient forests: A 2000 year history of land use in northeastern French forests deduced from the pollen compositions of closed depressions. *The Holocene* 23(5): 678–691.
- European Commission. 1999. Interpretation Manual of European Habitats EUR 15. Bruxelles: European Commission.
- European Commission. 2007. Interpretation Manual of European Habitats EUR 27. Bruxelles: European Commission.
- Gamez P. 1985. Karstologie lorraine. *Spéléo L* 15 (spécial: la spéléologie en Lorraine): 35–45.

- Gebhardt A, Occhietti S, Fechner K. 2014. Grandes phases de pédogenèse, d'érosion et d'anthropisation des sols au cours de la seconde moitié de l'Holocène en Lorraine (France). *ArcheoSciences, revue d'archéométrie* 38: 7–29.
- Georges-Leroy M. 2011. Airborne Laser scanning for the management of archeological sites in Lorraine (France). In: Cowley DC, ed. *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management*. In: *Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, 25–27 March 2010, Reykjavik, Iceland*. Occasional Publication of the Aerial Archaeology Research Group n°3. Bruxelles: Europae Archaeologia Consilium (EAC); (EAC Occasional Paper, 5), pp. 229–234.
- Georges-Leroy, M., 2020. Typologie d'après LiDAR des structures agraires et parcellaires fossilisées sous couvert forestier en Lorraine. *Archéologies numériques* 1(4): 16.
- Gillijns K, Poesen J, Deckers J. 2005. On the characteristics and origin of closed depressions in loess-derived soils in Europe – a case study from central Belgium. *Catena* 60: 43–58.
- Goepp S (dir.), Dohr S, Dolata J, et al. 2010. Etude des mardelles de deux secteurs de la LGV. Communes de Lesse et Lucy (57), Commune de Belles Forêts, Langatte, Dolving et Haut-Clocher. TGV Est seconde phase – Section Dannes-et-Quatre-Vents à Baudrecourt. Rapport de diagnostic archéologique. Metz: Inrap Grand Est nord.
- Grosse-Brauckmann G. 1972. Über pflanzliche Makrofossilien mitteleuropäischer Torfe. I. Gewebereste krautiger Pflanzen und ihre Merkmale. *Telma* 2: 19–55.
- Grosse-Brauckmann G. 1974. Über pflanzliche Makrofossilien mitteleuropäischer Torfe. II. Weitere Reste (Früchte, Samen, Moose, u.a.) und ihre Bestimmungsmöglichkeiten. *Telma* 4: 51–117.
- Gueidan A, Trémoilières M. 2003. Flore aquatique. Phytosociologie et cartographie. Rapport de l'état initial «Mission de suivi scientifique du polder d'Erstein». Strasbourg: VNF/SNS.
- Härbele D. 1928. Zur Kenntnis der Maren (Mardellen, Pfühle) Südwestdeutschlands und Lothringens. *Geographische Zeitschrift* 34: 260–270.
- Jacomet S, Kreuz A. 1999. Archäobotanik. Aufgaben, Methoden und Ergebnisse vegetations-und agrargeschichtlicher Forschung. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Jusseret S, Olivier L, Watteaux M, Riddiford NG, Branch NP. 2015. Le Briquetage de la Seille (Moselle) : géoarchéologie et archéogéographie d'un complexe d'exploitation intensive du sel à l'âge du Fer. In: Roure R, Olmer F, eds. *Les Gaulois au fil de l'eau. Actes du 37e Colloque international de l'Association Française pour l'Étude de l'Âge du Fer, 8–11 Mai 2013, Montpellier* (Monographies d'Archéologie Méditerranéenne).
- Katz NJ, Katz SV, Skobeyeva EI. 1977. Atlas Rastitel'nyh Oostatkov v Torfe (Atlas of Plant Remains in Peats). Moscow, Nedra. (en russe).
- Klag T. 1990. Marly, «Clos des Sorbiers». Document final de synthèse. Metz: SRA de Lorraine.
- Klag T, Dolata J. 1998. Fouilles archéologiques sur le tracé du contournement sud-est de Yutz (Moselle), Campagnes 1994–1995. DFS de fouille d'archéologie préventive. Metz: SRA de Lorraine.
- Klag T (dir.), Etienne D, Ollive V, Tegel W, Wiethold J, Klag P. 2015. Belles-Forêts, Haut-Clocher, Loudrefing, Moselle, Le Fort Buisson, Lohwald, Kalestroos. Nouvelles données sur la formation des mardelles du Plateau lorrain : [LGV Est Européenne]. Rapport de fouille archéologique. Metz: INRAP Grand Est nord, Service Régional d'Archéologie de Lorraine.
- Kołodzyńska-Gawrysiak R, Poesen J. 2017. Closed depressions in the European loess belt – Natural or anthropogenic origin? *Geomorphology* 288: 111–128.
- Körber-Grohne U. 1964. Bestimmungsschlüssel für subfossile Juncus-Samen und Gramineen-Früchte. Probleme der Küstenforschung im südlichen. *Nordseegebiet* 7: 1–47.
- Körber-Grohne U. 1991. Bestimmungsschlüssel für subfossile Juncus-Samen und Gramineen-Früchte. Probleme der Küstenforschung im südlichen. *Nordseegebiet* 18: 1–234.
- Lambinon J, Verloove F. 2012. Nouvelle Flore de la Belgique, du Grand-Duché de Luxembourg, du Nord de la France et des Régions voisines (Ptéridophytes et Spermatophytes), 6e éd. Meise: Editions du Patrimoine du Jardin botanique national de Belgique.
- Le Roux J. 1999. Le contexte structural de l'Est du Bassin parisien et les relations avec la sédimentation. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris* 36(1): 7–13.
- Le Roux J. 2000. Structuration du nord-est du bassin de Paris. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris* 37(4): 13–34.
- Linkenheld E. 1927. Les mardelles de Lorraine. *Bulletin de l'Association Philomathique d'Alsace et de Lorraine*, tome 7(3): 190–212.
- Linkenheld E. 1928. Die Lothringischen Mertel. *Elsaßland* 8: 237–245.
- Losson B. 2003. Karstification et capture de la Moselle (Lorraine, France) : vers une identification des interactions. Thèse de doctorat, Université Metz.
- McCormick M, Büntgen U, Cane MA, et al. 2012. Climate Change during and after the Roman Empire: Reconstructing the Past from Scientific and Historical Evidence. *Journal of Interdisciplinary History* 43(2): 169–220.
- Mauquoy D, Van Geel B. Mire and peat macros. In: Elias SA, ed. *Encyclopedia of Quaternary Science*, Vol. 3. Amsterdam: Elsevier, 2007, pp. 2315–2336.
- Mauquoy D, Hughes PDM, Van Geel B. 2010. A protocol for plant macrofossil analysis of peat deposits. *Mires and Peat* 7: 1–6. http://www.mires-and-peat.net/map07/map_07_06.pdf (last consult 2013/20/11).
- Mauz B. 2007. Origin and evolution of closed depressions in central Belgium, European loess belt. *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 574–586.
- Nicod J. 1976. Karsts des gypses et des évaporites associées. *Annales de Géographie* 85(471): 513–554.
- Nicod J. 1993. Karsts des gypses, Morphologie, hydrologie, environnement. *Karstologia* 21: 21–30.
- Nicod J. 1994. Plateaux karstiques sous couverture en France. *Annales de Géographie* 103(576): 170–194.
- Nicod J. 1995. Carte géomorphologique des karsts de France. *Karstologia* 25: 21–34.
- Nicod J. 2002. Karsts, paléo-géomorphologies, paléo-environnements. Panorama des recherches récentes en France (1992–2001). *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 8(3): s 253–268.
- Oberdorfer E. 1992. Süddeutsche Pflanzengesellschaften. Teil I: Fels- und Mauergesellschaften, alpine Fluren, Wasserverlandungs- und Moorgesellschaften. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.
- Oberdorfer E. 2001. Pflanzensoziologische Exkursionsflora für Deutschland und angrenzende Gebiete, 8^e éd. Stuttgart: E. Ulmer Verlag.
- Olivier L. 2001. Le « Briquetage de la Seille » (Moselle) : nouvelles recherches sur une exploitation proto-industrielle du sel à l'âge du Fer. *Antiquités nationales* 32: 143–171.
- Olivier L. 2003. Nouvelles recherches sur l'exploitation du sel de la Haute Seille à l'âge du Fer. *Le Pays lorrain* 84(1): 15–26.
- Olivier L, Kovacik J. 2006. The Briquetage de la Seille (Lorraine, France): protoindustrial salt production in the European Iron Age. *Antiquity* 80: 558–566.

- Ollive V, Ernst T, Franck J, Meyer N, Thomashaussen L, Viller S. 2016. L'érosion agricole d'un petit bassin versant lorrain depuis 2000 ans : Géoarchéologie de la LGV-Est Européenne. *Quaternaire* 27(1): 27–37.
- Otto KH, Hofle HC. 1994. Genesis and ontogeny of a closed depression in Toppenstedt, south of Hamburg. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 38(1): 91–103.
- Pierre G, Devos A, Bollot N. 2017. Origin and influence of the superficial structure on the morphogenesis (Eocene plateau of the eastern Paris Basin). *Geo Res J* 13: 103–113.
- Pissart A. 2003. The remnants of Younger Dryas lithalsas on the Hautes Fagnes Plateau in Belgium and elsewhere in the world. *Geomorphology* 52: 5–38.
- Rabien I. 1953. Zur Bestimmung fossiler Knospenschuppen. *Paläontologische Zeitschrift* 27(1/2): 57–66.
- Ramsey CB. 1995. Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: The OxCal program. *Radiocarbon* 37(2): 425–430.
- Reimer PJ, Baillie MGL, Bard E, *et al.* 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50 000 years cal BP. *Radiocarbon* 51(4): 1111–1150.
- Riddiford NG, Branch NP, Green CP, Armitage SJ, Olivier L. 2012. Holocene palaeoenvironmental change and the impact of prehistoric salt production in the Seille Valley, Eastern France. *The Holocene* 22(8): 831–845.
- Riddiford NG, Branch NP, Jusseret S, Olivier L, Green CP. 2016. Investigating the human–environment relationship of early intensive salt production: A case study from the Upper Seille Valley, Lorraine, northeast France. *Journal of Archaeological Science: Reports* 10: 390–402.
- Ruffaldi P. 1999. Premières traces polliniques de Néolithisation des zones de basse altitude de Lorraine (France). *Quaternaire* 10 (4): 263–270.
- Ruffaldi P, Ritz F, Richard H, Dambrine E, Dupouey JL. 2007. Analyse pollinique de la mardelle d'Assenoncourt (Moselle, France) : impact des pratiques agricoles sur la biodiversité végétale en milieu forestier. In: Dupouey JL, Dambrine E, Dardignac C, eds, *La mémoire des forêts*. In: *Actes du colloque « Forêt, archéologie et environnement »*, 14–16 décembre 2004. Office National des Forêts & Institut National de la Recherche Agronomique, Paris & Direction Régionale des Affaires Culturelles de Lorraine, Nancy, pp. 69–77.
- Slotboom RT. 1963. A comparative geomorphological and palynological investigation of the Pingos (Viviers) in the Hautes-Fagnes (Belgium) and the Mardellen in the Gutland (Luxemburg). *Zeitschrift für Geomorphologie* 7: 193–231.
- Tegel W, Vanmoerkerke J, Büntgen U. 2011. Up-dating historical tree-ring records for climate reconstruction. *Quaternary Science Review* 29: 1957–1959.
- Thoen D, Herault B. 2006. Flore, groupes socio-écologiques et typologie des mardelles forestières de Lorraine belge et luxembourgeoise. *Bulletin de la Société des Naturalistes Luxembourgeois* 107: 3–25.
- Tomlinson P. 1985. An aid to the identification of fossil buds, bud-scales and catkin-bracts of British trees and shrubs. *Circaea* 3: 45–130.
- Van Vliet-Lanoë V, Pissart A, Baize S, Brulhet J, Ego F. 2019. Evidence of multiple thermokarst events in northeastern France and southern Belgium during the two last glaciations. A discussion on “Features caused by ground ice growth and decay in Late Pleistocene fluvial deposits, Paris basin, France” (Bertran *et al.*, 2018). *Geomorphology* 327: 613–628.
- Vanwallegem T, Van Den Eeckhaut M, Poesen J, Govers G, Deckers J. 2008. Spatial analysis of factors controlling the presence of closed depressions and gullies under forest: Application of rare event logistic regression. *Geomorphology* 95: 504–517.
- Wagner PE, ed. 2003. Les Naudin entre Meuse et Vosges. Metz: Médiathèque du Pontiffroy.
- Welter T. 1905. Die Maren oder Mardellen : Keltische Wohngruben in Lothringen. *Correspondenz-Blatt der Deutschen Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte* 34(11): 132–134.
- Welter T. 1908. Les Mares ou Mardelles : Habitations souterraines celtiques en Lorraine. *Bulletin de la Société préhistorique de France* 5(1): 41–52.
- Welter T. 1920. Les mares, habitations souterraines de nos ancêtres en Lorraine. In: *Compte rendu de la 44^e session*. Strasbourg: Association Française pour l'Avancement des Sciences, pp. 521–523.
- Welter T. 1921. Un fond de cabane préhistorique à la ferme de Sainte-Agathe dans le finage de Woippy. *Annuaire de la Société d'Histoire et d'Archéologie de Lorraine* 30: 511–512.
- Welter T. 1923. Les mardelles de Lorraine. *Les Cahiers Lorrains* 6: 156–172.
- Wichmann K. 1903. Über die Mare oder Mertel in Lothringen. *Jahrbuch der Gesellschaft für Lothringische Geschichte und Altertumskunde* 15: 218–262.

Citation de l'article : Ollive V, Wiethold J, Klag T, Klag P. 2021. Origine, processus de formation et évolution des mardelles du Nord-Est du Bassin Parisien (France), *BSGF - Earth Sciences Bulletin* 192: 28.