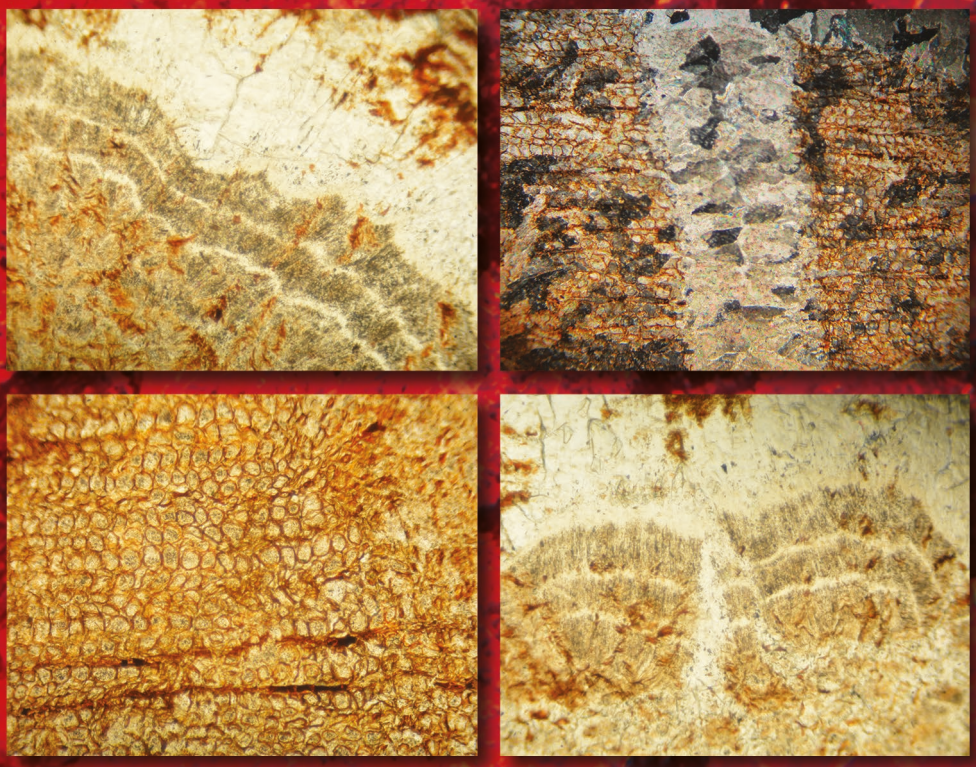
geodiversitas

2022 • 44 • 24

Taphonomie et minéralisation de bois carbonatisés du Purbeckien de l'Usine, à Cherves-Richemont (Charente)

Didier NÉRAUDEAU, Marc PHILIPPE, Abderrazak EL ALBANI, Jean-David MOREAU, France POLETTE & Jean-Paul SAINT MARTIN



art. 44 (24) — Publié le 13 juillet 2022
www.geodiversitas.com

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

MUSÉUM NAL HIST NATURELLE

Directeur de la publication / *Publication director* : Bruno David,
Président du Muséum national d'Histoire naturelle

Rédacteur en chef / *Editor-in-chief*: Didier Merle

Assistant de rédaction / *Assistant editor*: Emmanuel Côtez (geodiv@mnhn.fr)

Mise en page / *Page layout*: Emmanuel Côtez

Comité scientifique / *Scientific board*:
Christine Argot (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris)
Beatrix Azanza (Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid)
Raymond L. Bernor (Howard University, Washington DC)
Henning Blom (Uppsala University)
Jean Broutin (Sorbonne Université, Paris, retraité)
Gaël Clément (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris)
Ted Daeschler (Academy of Natural Sciences, Philadelphie)
Bruno David (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris)
Gregory D. Edgecombe (The Natural History Museum, Londres)
Ursula Göhlich (Natural History Museum Vienna)
Jin Meng (American Museum of Natural History, New York)
Brigitte Meyer-Berthaud (CIRAD, Montpellier)
Zhu Min (Chinese Academy of Sciences, Pékin)
Isabelle Rouget (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris)
Sevket Sen (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, retraité)
Stanislav Štamberg (Museum of Eastern Bohemia, Hradec Králové)
Paul Taylor (The Natural History Museum, Londres, retraité)

Couverture / *Cover*:
Réalisée à partir des Figures de l'article/*Made from the Figures of the article*.

Geodiversitas est indexé dans / Geodiversitas *is indexed in:*
– Science Citation Index Expanded (SciSearch®)
– ISI Alerting Services®
– Current Contents® / Physical, Chemical, and Earth Sciences®
– Scopus®

Geodiversitas est distribué en version électronique par / Geodiversitas *is distributed electronically by:*
– BioOne® (http://www.bioone.org)

Les articles ainsi que les nouveautés nomenclaturales publiés dans *Geodiversitas* sont référencés par / *Articles and nomenclatural novelties published in* Geodiversitas *are referenced by:*
– ZooBank® (http://zoobank.org)

Geodiversitas est une revue en flux continu publiée par les Publications scientifiques du Muséum, Paris
Geodiversitas *is a fast track journal published by the Museum Science Press, Paris*

Les Publications scientifiques du Muséum publient aussi / *The Museum Science Press also publish:* ***Adansonia***, ***Zoosystema***, ***Anthropozoologica***, ***European Journal of Taxonomy***, ***Naturae***, ***Cryptogamie*** **sous-sections** ***Algologie***, ***Bryologie***, ***Mycologie, Comptes Rendus Palevol***

Diffusion – Publications scientifiques Muséum national d'Histoire naturelle
CP 41 – 57 rue Cuvier F-75231 Paris cedex 05 (France)
Tél. : 33 (0)1 40 79 48 05 / Fax : 33 (0)1 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr / http://sciencepress.mnhn.fr

© Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 2022
ISSN (imprimé / *print*) : 1280-9659/ ISSN (électronique / *electronic*) : 1638-9395

Taphonomie et minéralisation de bois carbonatisés du Purbeckien de l'Usine, à Cherves-Richemont (Charente)

Didier NÉRAUDEAU
CNRS UMR 6118 Géosciences, Université de Rennes I,
Campus de Beaulieu, avenue du Général Leclerc, F-35042 Rennes (France)

Marc PHILIPPE
CNRS UMR 5023 LEHNA, ENTPE-Université de Lyon 1, F-69622 Villeurbanne (France)

Abderrazak EL ALBANI
CNRS UMR IC2MP 7285 HYDRASA, Université de Poitiers,
5 rue Albert Turpin, F-86073 Poitiers (France)

Jean-David MOREAU
CNRS UMR 6282 Biogéosciences, Université de Bourgogne Franche-Comté,
6 boulevard Gabriel, F-21000 Dijon (France)

France POLETTE
CNRS UMR 6118 Géosciences, Université de Rennes I,
Campus de Beaulieu, avenue du Général Leclerc, F-35042 Rennes (France)

Jean-Paul SAINT MARTIN
CR2P (CNRS, MNHN, UPMC, Sorbonne Université), Muséum national d'Histoire naturelle,
case postale 38, 57 rue Cuvier, F-75231 Paris cedex 05 (France)

Soumis le 29 septembre 2021 | accepté le 18 janvier 2022 | publié le 13 juillet 2022

urn:lsid:zoobank.org:pub:FFD49189-162A-450F-8003-1AB98421FE6D

Néraudeau D., Philippe M., El Albani A., Moreau J.-D., Polette F. & Saint Martin J.-P. 2022. — Taphonomie et minéralisation de bois carbonatisés du Purbeckien de l'Usine, à Cherves-Richemont (Charente). *Geodiversitas* 44 (24): 665-682. https://doi.org/10.5252/geodiversitas2022v44a24. http://geodiversitas.com/44/24

RÉSUMÉ
Les faciès purbeckiens de Cherves-Richemont, en Charente (SO France), comprennent au-dessus de la série évaporitique des gypses de Chamblanc une série marno-calcaire fossilifère. Dans le secteur de l'Usine, cette série carbonatée présente deux faciès remarquables par leur contenu en bois fossiles carbonatisés. En surface persistent des blocs relictes d'un conglomérat calcaire, disloqué par les labours, riche en encroûtements tubulaires, carbonatés et fibroradiés, d'axes végétaux, associés à des fragments de fusain. Ce faciès conglomératique comporte également des galets d'os de grands reptiles et des écailles de poissons *Lepidotes* Agassiz, 1832. À environ 40 cm de profondeur, une fouille sur le site a permis de mettre au jour, dans une couche marneuse, des tronçons métriques de bois carbonatisé, encroûtés par des sphérules fibreuses carbonatées. L'analyse géochimique des bois confirme une minéralisation exclusivement carbonatée (ni gypse, ni silice). Les lames minces réalisées dans les bois révèlent une fine carbonatisation à l'échelle cellulaire, surtout hyperblastique ou polyblastique, vraisemblablement d'origine microbienne. La détermination des bois au microscope électronique à balayage permet de les attribuer au genre *Agathoxylon* Hartig, 1848, témoignage fréquent des gymnospermes mésozoïques. Le milieu de dépôt est interprété comme continental ou margino-littoral. La position stratigraphique de ces faciès à bois carbonatisés, un peu au-dessus des gypses berriasiens de Champblanc, en fait un équivalent latéral probable du site berriasien final à dinosaures et bois fossiles d'Angeac-Charente.

MOTS CLÉS
SO France,
Charente,
Berriasien,
bois fossile,
minéralisation de calcite,
carbonatisation,
faciès purbeckien,
combinaison nouvelle.

ABSTRACT

Taphonomy and mineralization of carbonated wood from the Purbeckian facies of l'Usine, Cherves-Richemont (Charente).

Lower Cretaceous deposits from the Charentes region, in southwestern France, correspond to Purbeckian facies of continental to brackish environments, locally rich in evaporitic formations (Manès 1850; Pouech *et al.* 2006, 2014, 2015; Schnyder *et al.* 2012; Vullo *et al.* 2014; Moreau *et al.* 2017b). Three fossiliferous localities have been previously identified: the Berriasian gypsum of Champblanc, near Cherves, with both teeth accumulations and bone beds of fishes, crocodiles and dinosaurs, but relatively poor in fossil wood (Buffetaut *et al.* 1989; Le Loeuff *et al.* 1996; Schnyder 2003; Colin *et al.* 2004; El Albani *et al.* 2004; Mazin *et al.* 2006; Rees *et al.* 2013); the Berriasian marls and calcareous conglomerate of Angeac-Charente, particularly rich in dinosaur megaremains and lignitic accumulations (Néraudeau *et al.* 2012; Allain *et al.* 2014; Benoît *et al.* 2017; Polette *et al.* 2018; Polette 2019); the Purbeckian to Wealden clay and conglomerate of the Rochefort area, providing large bones of dinosaurs in surface blocks, but never observed in stratigraphical position (Vullo *et al.* 2012). Another fossiliferous Purbeckian locality from the Charentes region, the Chassiron coast of Oleron Island, is rich in vertebrate and plant remains, but mainly Tithonian in age (Vullo *et al.* 2014; Moreau *et al.* 2017b).

This paper presents a fourth Charentese Purbeckian locality with the first case of calcite mineralized wood known in Mesozoic deposits from France. The Purbeckian facies is located at Cherves-Richemont, in Charente (SW France), at 3 km east of the Champblanc gypsum quarry, in the L'Usine locality (Figs 1; 2). The stratigraphical position of the marls and the conglomerate with calcite mineralized wood is at mid-distance from the lower to mid-Berriasian gypsum series of the Champblanc quarry, to the east, and the unconformity with the lower Cenomanian sands that erode the Purbeckian series, to the west (Fig. 3) (Coquand 1858, 1862; Platel 1980; Bourgueil *et al.* 1986). Consequently, the fossil wood locality of L'Usine is a probable lateral equivalent of the uppermost Berriasian bone and wood beds of Angeac-Charente, located at about 25 km only (Gônet *et al.* 2018; Polette *et al.* 2018; Rozada 2019).

There is no real outcrop at L'Usine, and the limestones with fossil wood can be mainly observed on surface blocks in fields and vineyards. Two outstanding facies, rich in calcite mineralized wood, can be observed. First, the surface of the fields shows abundant relic blocks of a calcareous conglomerate, rich in tubular, fibrous and carbonated incrusting of plant axes, associated to fragments of fusain. The conglomerate contains reptile bone pebbles and *Lepidotes* Agassiz, 1832 fish scales too. At a depth of 40 cm, an excavation has shown marls containing large pieces of calcite mineralized wood (about 1 m), incrusted by fibrous carbonated spherules (Figs 2; 4). The geochemical analyses of the marls and the fossil wood by X-ray diffraction, realized according to the method of Moore & Reynolds (1997), confirm the mineralization by carbonate only. Dolomite and silica are very scarce and gypsum is lacking (Fig. 5).

Polished sections (Fig. 2) and thin sections (Figs 6; 7) of calcite mineralized wood show processes of centripetal mineralization (Higgins 1960; Buurman 1972; Marynowski *et al.* 2007; Mustoe 2018; Mustoe & Beard 2021). The microscopic observations reveal a fine mineralization at the cell scale, mainly hyperblastic or polyblastic (sometimes oligoblastic, likely of microbial origin. Cell lights are filled by sparry calcite. Some "tuff structures" of wood mineralization are characteristic of certain tuff of filamentous cyanobacteries (e.g. *Rivularia* C.Agardh ex Bornet & Flahault, 1886, ou *Shizothrix* Kützing ex Gomont, 1892) common in the geological record (Freytet & Plaziat 1965; Freytet & Plet 1991; Caudwell *et al.* 1997; Freytet & Verrecchia 1998; Freytet 2000; Pentecost 2003; Hägele *et al.* 2006; Sanders *et al.* 2006; Arenas & Jones 2007). A zonation of the mineralization can often been observed on thin sections of wood but corresponds more likely to successive mineralization steps by cyanobacterial mats than to steps of wood growth.

The observations of wood fragments with Scanning Electron Microscopy allow to identify a tracheidoxyl (Creber 1972) with araucarioid structures of the genus *Agathoxylon* Hartig, 1848, a common Mesozoic fossil gymnosperm wood, abundant in the Charentese region of SW France (Fig. 8) (Néraudeau *et al.* 2002, 2003; Philippe *et al.* 2008, 2010, 2018; Philippe 2011; Vullo *et al.* 2014). The pitting is mainly uniseriate, when the punctuation is mainly biseriate for *Agathoxylon gardoniense* Crié, typical of the mid-Cretaceous deposits of Charentes. Consequently, the *Agathoxylon* from L'Usine could belong to another palaeoecological morph of *A. gardoniense*, possibly to another species.

The deposit environment that has gathered gymnosperm trunks and branches, eroded reptile bones (e.g. sauropods) and freshwater to brackish fish remains (e.g. *Lepidotes*) is interpreted as continental to coastal, in freshwater or brackish conditions.

KEY WORDS
SW France,
Charente,
Berriasian,
fossil wood,
calcite mineralization,
carbonatization,
Pubeckian facies,
new combination.

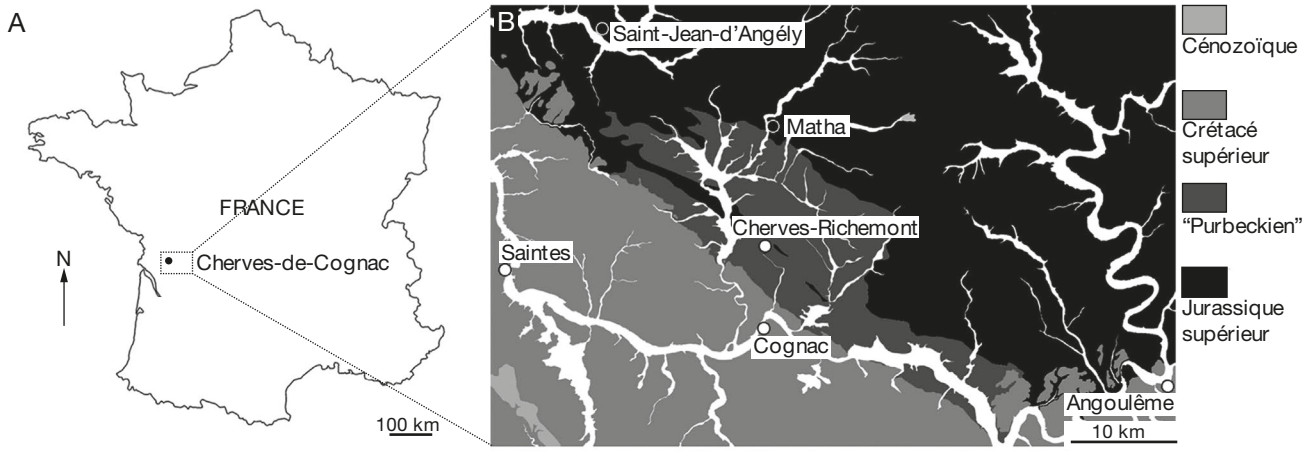


FIG. 1. — Carte de localisation du site étudié, à Cherves-de-Cognac, en Charente (SO France).

INTRODUCTION

Les faciès purbeckiens (Tithonien-Berriasien) des Charentes constituent un ensemble sédimentaire complexe dont la stratigraphie reste mal connue, car très peu étudiée depuis les travaux précurseurs de Manès (1850) et Coquand (1858, 1862). Seules trois localités remarquables par leur contenu en vertébrés fossiles ont fait l'objet d'analyses détaillées au cours des dernières décennies. Il s'agit des carrières de Cherves (Schnyder 2003 ; Colin *et al.* 2004 ; El Albani *et al.* 2004 ; Polette 2019), d'Angeac-Charente (Néraudeau *et al.* 2012 ; Benoît *et al.* 2017 ; Polette *et al.* 2018 ; Polette 2019) et de l'estran des falaises de Chassiron, sur l'île d'Oléron (Schnyder *et al.* 2012 ; Vullo *et al.* 2014 ; Moreau *et al.* 2017b ; Polette 2019).

Les exploitations de gypses de Champblanc à Cherves ont été les premières à avoir été étudiées et, après plus de 10 ans de fouilles ou d'investigations ponctuelles, divers niveaux à microrestes de poissons, dinosaures et crocodiliens y ont été mis en évidence (Buffetaut *et al.* 1989 ; Le Loeuff *et al.* 1996 ; Mazin *et al.* 2006 ; Pouech *et al.* 2006, 2014, 2015 ; Rees *et al.* 2013), mais relativement peu de données sur les végétaux fossiles, à l'exception de l'identification de bois de conifères de type *Agathoxylon* Hartig, 1848 dans la partie inférieure (Unité 1) de la série évaporitique (El Albani *et al.* 2004 ; Philippe *et al.* 2008).

Le second site le plus étudié est celui d'Angeac-Charente, où un programme de fouilles débuté en 2010 a déjà permis de mettre au jour une extraordinaire accumulation d'ossements et de carapaces de vertébrés en plus de divers microrestes (Allain *et al.* 2014 ; Gônet *et al.* 2018 ; Rozada 2019). Les éléments paléobotaniques des *bone beds* y ont été sommairement étudiés et correspondent là-encore à des bois de type *Agathoxylon*. À ceci s'ajoutent des rameaux feuillés (*Watsoniocladus* Srinisavan) et des cônes de conifères, des fragments de fougères, des graines (Néraudeau *et al.* 2012) et divers palynomorphes (Polette *et al.* 2018).

En plus des carrières de Cherves et d'Angeac-Charente, l'estran de Chassiron, sur l'île d'Oléron, est la troisième localité des Charentes qui a permis de décrire des faciès purbeckiens à vertébrés (dents, ossements, pistes de vertébrés) et plantes terrestres (Vullo *et al.* 2014 ; Moreau *et al.* 2017b ; Polette 2019). Les bois fossiles, très abondants sur ce site, ont également été rapportés au genre *Agathoxylon* (Vullo *et al.* 2014).

À ces trois premiers sites, fouillés et stratigraphiquement bien décrits, s'ajoutent les faciès purbecko-wealdiens de la région de Rochefort-sur-Mer, dont des ossements de dinosaures, conservés au Muséum de La Rochelle, ont été collectés au XIX^{ème} siècle. Malheureusement, l'origine géologique précise de ces vertébrés n'est pas connue et quelques sondages récents (D. Néraudeau pers. obs.) n'ont pas permis de retrouver de *bone bed* dans ce secteur. Seules les observations de surface permettent d'attester la présence de faciès wealdiens, évaporitiques, lumachelliques, ou conglomératiques, mais pas celle de végétaux fossiles (Vullo *et al.* 2012). Après analyse palynologique, ces différents faciès se sont révélés stériles (F. Polette pers. obs.).

La présence « de troncs et de branches passés à l'état de lignite » a déjà été signalée par Coquand (1858: 606) dans les intercalations argileuses de la série gypseuse du Purbeckien de Charente. L'auteur ajoutait qu'une collection privée (M. Baugat) contenait même « un fragment de bois enclavé dans le gypse ». Bourgueil *et al.* (1986: 13) ont ensuite cité les observations de Coquand en mentionnant « une branche d'arbre prise dans du gypse » dans la carrière de Champblanc à Cherves-Richemont. Mais à ce jour aucune publication n'avait décrit de bois carbonatisé dans les faciès purbeckiens charentais. Cet article présente un site purbeckien fossilifère inédit, riche en bois carbonatisés, localisé sur la commune de Cherves-Richemont (Fig. 1), mais différent de celui des carrières de Champblanc précédemment cité (e.g. El Albani *et al.* 2004). Ce gisement, dit de l'Usine en référence au lieu-dit fossilifère, est remarquable par l'abondance, la taille et la minéralisation originale de ses mégarestes végétaux en carbonates. Une interprétation taphonomique est proposée.



Fig. 2. — Zone de prélèvement et échantillons de bois prélevés sur le site de l'Usine, à Cherves-de-Cognac : **A**, vue générale du site avant la fouille ; **B**, début de fouille faisant apparaître un tronc ; **C**, tronc totalement dégagé par la fouille ; **D**, partie de tronc sciée à une extrémité permettant de révéler la structure du bois ; **E**, vue de dessus de la section polie du bois figurée en D ; **F**, section polie d'un autre échantillon (n°MP1960). Échelles : 5 cm.

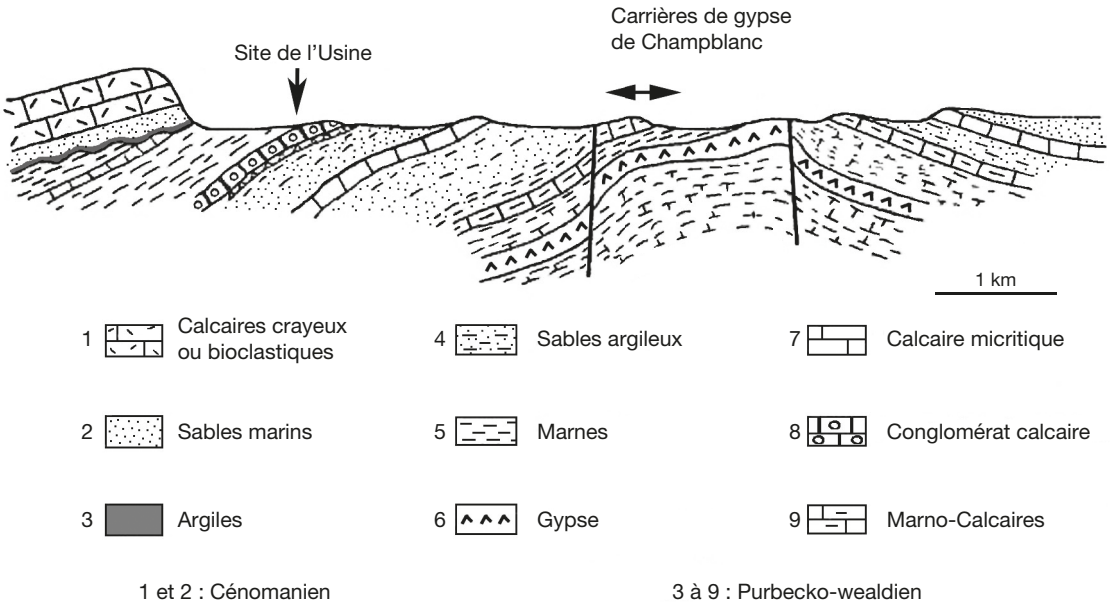


FIG. 3. — Coupe du secteur étudié, initialement publiée par Coquand en 1858. Le site de l'Usine y apparaît proche des affleurements cénomaniens, dans des faciès purbeckiens plus récents que ceux de la carrière de gypse de Chamblanc, juste au-dessus d'un faciès conglomératique (faciès n°8).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

HISTORIQUE DES DÉCOUVERTES

Les premiers troncs prélevés sur le site ont été récoltés en surface dans les années 1970, par Joël Drochon et Jacques François (Société historique, archéologique, et littéraire de Barbezieux, SHALB), puis par d'autres prospecteurs amateurs de l'association Fossiles et Minéraux des deux Charentes (FM2C), dans une vigne au lieu-dit l'Usine, sur la commune de Cherves-Richemont (Fig. 1). Ces vignes, exploitées par la famille Fallourd, qui a soutenu ce projet de recherche, présentent en surface une grande richesse en bois fossile, ce qui a motivé une fouille, organisée en février 2013 par Joël Drochon et l'association FM2C (Fig. 2A, B). Lors de cette fouille, a été mise en évidence une couche argileuse grise à olivâtre au sein de laquelle sont préservées des portions de troncs pétrifiés (Fig. 2C-E).

CADRE GÉOLOGIQUE ET PALÉONTOLOGIQUE

La localisation du site sur la carte géologique de Matha au 1/50 000ème (Bourgueil *et al.* 1986), le place à proximité, mais stratigraphiquement en dessous, des premiers affleurements cénomaniens basaux (200 m à l'ouest), et au-dessus de la série gypseuse de la carrière de Champblanc (3 km à l'est). Cette localisation stratigraphique est confirmée par le profil géologique de la région de Cherves réalisé par Coquand (1858), puis repris par différents auteurs (e.g. Platel 1980), profil qui met en évidence l'âge de plus en plus jeune d'est en ouest des faciès purbeckiens de Champblanc au site de l'Usine, jusqu'à la discordance avec le Cénomanien (Fig. 3). Le site paléontologique présente à la surface du sol des vignes (partie arable) des blocs de conglomérat (à graviers calcaires et fragments de bois), et des troncs pétrifiés sans gangue. Seuls les troncs ont été retrouvés *in situ* en fouille, à 30-40 cm sous la terre arable, dans une marne grise (Fig. 2C) dépourvue de tout autre fossile.

Les portions de branches et de troncs (Fig. 2C, D; 4D) présents dans la marne sont parfois spectaculaires par leur taille (plus d'1 m de long, plus de 30 cm de diamètre). Ils sont généralement de couleur claire, beige ou rosée, avec de très nombreux encroûtements par des agglomérats de sphérules fibreuses rayonnantes, millimétriques à centimétriques (Fig. 4E, F), qui leur donnent partiellement un aspect botryoïdal en surface (Fig. 4D). L'abondance de mégarestes végétaux est remarquable dans les conglomérats, de couleur ocre, sous forme de grands tubes minéralisés de couleur claire (Fig. 4A, C), et de petits débris anguleux noirâtres semblant fusinisés (Fig. 4B). Dans le même conglomérat, sont donc présents du bois pétrifié en grands débris (pluricentimétriques à décimétriques) et des éléments plus petits (< 2 cm) anguleux et encore carbonés (de type fusain). Les tubulures minéralisées (Fig. 4A) ont la particularité d'être formées par un manchon de calcite fibreuse rayonnante (Fig. 4E, F), en « croûte » autour d'une lumière centrale, de diamètre millimétrique à centimétrique, qui peut être interprétée comme le fantôme d'un axe végétal dissout, seul son encroûtement calcaire étant préservé. Les faces externes de ces tubulures (à section circulaire, en 8, ou ellipsoïdale) sont régulières et lisses (Fig. 4A[st1 à st3]). L'accumulation sédimentaire des bois a donc mêlé des restes ayant subi des transports et des fragmentations très variables en distance et en durée ; cela ne s'applique cependant qu'aux bois carbonatisés car les fusains se limitent à de petits fragments. Macroscopiquement, hormis les fragments de bois, le conglomérat semble dépourvu d'autres restes végétaux, tels que des feuilles ou des rameaux feuillés. Il présente parfois des galets pluricentimétriques d'os de dinosaures de grande taille (Fig. 4C), et des fragments centimétriques de crocodiliens et de chéloniens.

TABLEAU 1. — Liste des échantillons étudiés, avec leurs numéros de référence dans les collections de l'Université de Rennes I (IGR) et de l'Université Claude Bernard – Lyon I (MP), et le rappel des numéros des figures les illustrant dans cet article.

Description de l'échantillon	Surfaces polies ou naturelles	Lames minces	Préparations MEB	Analyse Géochimique
Portions de tronc prélevées en fouille	IGR DN1 (Fig. 2B, C)	–	–	–
Portion de tronc à section polie	Collection J. Drochon (Fig. 2E, F)	–	–	–
Section polie	MP1960 (Fig. 2F)	–	–	–
Conglomérat avec tubulures	IGR DN2 (Fig. 4A)	–	–	–
Conglomérat avec tubulures	MP1974 (non illustré)	–	–	–
Conglomérat avec fusains	IGR DN3 (Fig. 4B)	–	–	–
Conglomérat avec os	IGR DN4 (Fig. 4C)	–	–	–
Bois avec encroûtement en relief	IGR DN5 (Fig. 4D)	–	–	–
Bois avec sphérules en section	IGR DN6 (Fig. 4E, F)	–	–	–
Bois utilisé pour les lames minces	–	IGR DN7 (Figs 6A-F ; 7A-F)	–	–
Conglomérat utilisé pour prélèvement des fusains	–	–	MP1954 (Fig. 8A-F)	–
Bois soumis à l'analyse géochimique	–	–	–	IGR DN8 (Fig. 5)

Il est relativement riche en écailles, dents et vertèbres de poissons *Lepidotes* Agassiz, 1832.

Il est à noter qu'une étude palynologique a été réalisée sur les sédiments associés aux bois fossiles. La première, réalisée par David Batten en 2014 sur les marnes englobant les troncs, ne contenait que des contaminants actuels. La seconde, réalisée par France Polette pour la préparation de cet article, sur un échantillon de conglomérat contenant des restes de bois sous forme ligniteuse, a livré beaucoup de microdébris organiques, sous forme de fusinite ou fragments de cuticules, mais un unique palynomorphe de type *Classopollis* Pflug., 1953.

Étude paléoxylologique et géochimique

Les bois fossiles du site de l'Usine se répartissent en deux faciès : 1) une gangue marneuse renfermant des portions pluridécimétriques de troncs et de branches (Fig. 2) ; et 2) un conglomérat à matrice calcaire contenant à la fois des fragments tubulaires recristallisés, souvent pluricentimétriques (Fig. 4A, D-F), et des fragments centimétriques de fusain (Fig. 4B).

Pour la détermination des bois fossiles, les portions de tronc et de branches issus des marnes ont fait l'objet de sections polies (Fig. 2D-F), et de lames minces, ces dernières ayant été réalisées et déposées à l'Université de Rennes 1 (n°IGR Cherves B1), à l'exception d'une tranche polie de bois minéralisé (illustrée en Fig. 2F) étudiée et conservée à l'Université Claude-Bernard, à Lyon, sous le numéro d'inventaire MP1960.

Les fusains provenant du conglomérat ont été étudiés au microscope électronique à balayage (MEB) et sont conservés à l'Université Claude-Bernard, à Lyon, sous le numéro MP1954.

L'aspect inhabituel des bois provenant des marnes, notamment des incrustations en sphérules fibreuses (Fig. 4D-F), et la qualité de leur préservation, ont motivé une analyse géochimique pour déterminer le ou les types de minéralisation mis en jeu lors de la fossilisation (Fig. 5). La composition minéralogique globale et celle de la fraction argileuse ont ainsi été déterminées par diffraction de rayons X à l'aide d'un diffractomètre Bruker D8 ADVANCE XRD avec une configuration Bragg-Brentano q/2q et une source au cuivre de longueur d'onde CuKα = 1.540598 Å opérant à 40 Kv et 40 mA avec un pas de 0.025 s. Après broyage manuel au mortier selon la procédure standard de Moore & Reynolds (1997), chaque échantillon a été conditionné pour une diffraction sur poudre désorientée dans le domaine angulaire de 2 à 65,2°.

Synthèse du matériel étudié

Les différentes études (observation macroscopique, surfaces polies, lames minces, observations au MEB, analyses géochimiques) qui ont été réalisées sur les bois carbonatisés de l'Usine correspondent pour l'essentiel à du matériel de référence conservé à l'Institut de Géologie de l'Université de Rennes I (IGR), complété par quelques échantillons conservés à l'Université Claude-Bernard Lyon I (MP). Le détail des échantillons et leurs caractéristiques sont rassemblés dans le Tableau 1.

RÉSULTATS

Bois carbonatisés provenant des marnes

Analyses géochimiques des bois carbonatisés

Un premier test à l'acide acétique 6 % sur les bois a produit une réaction indiquant la présence de carbonates ou de sulfates. Un second test à l'acide chlorhydrique dilué a été réalisé sur les sphérules microradiées incrustant les bois (Fig. 4D-F). Plongés dans ce bain acide pendant 1 heure, les sphérules ont été complètement dissoutes, confirmant la nature carbonatée ou sulfatée de ces incrustations. Il ne s'agit donc pas de bois silicifié.

Une analyse chimique plus poussée (Fig. 5) a confirmé la très faible proportion de silice dans les bois et une prédominance de carbonate (calcite) tant dans la structure ligneuse du bois fossile (Fig. 5A) que dans les sphérules fibroradiées qui l'encroûtent ou comblent ses cavités (Fig. 5B).

Sections polies des bois carbonatisés

Les sections polies des troncs carbonatisés (Fig. 2D-F) montrent des coupes transversales d'axes pluridécimétriques à symétrie radiale (Fig. 2D, E). L'aspect et la couleur varient fortement



FIG. 4. — Fossiles et structures minérales associés au bois carbonatisé du site de l'Usine, à Cherves : **A**, sections transversales (**st1**, **st2**, **st3**) et longitudinale (**sl**) encroûtements tubulaires d'axes végétaux, minéralisés en carbonate fibroradié, au sein du conglomérat ; **B**, fragments de bois préservés en partie sous forme charbonneuse, au sein du conglomérat contenant les bois carbonatisés ; **C**, galet d'os de dinosaure (**Os**) au cœur d'un bloc de conglomérat, à côté de sections longitudinales tubulaires de végétaux recristallisés (**sl**) ; **D**, concrétions carbonatées mamelonnées à la surface d'un tronçon de bois ; **E**, **F**, concrétions carbonatées mamelonnées vue en section faisant apparaître leur microstructure fibreuse rayonnante. Échelles : A-D, 3 cm ; E, 1 cm.

sur les sections, mais avec assez souvent des nuances brunes, avec des structures plutôt concentriques. Celles-ci évoquent une minéralisation tardive dans un bois déjà passablement attaqué par des microbes saproxyliques, bactéries ou champignons, et avec une phase d'imprégnation par des oxydes et hydroxydes métalliques (fer). La périphérie semble plus altérée que le centre.

La tranche (n°MP1960) est complètement recristallisée (Fig. 2F). Il reste quelques microzones où l'on peut deviner qu'il s'agissait d'un bois homoxylé (donc de type conifère). Cela concerne moins de 0,5 % de la section. On observe cependant macroscopiquement une zonation. À la loupe, celle-ci s'avère parallèle à la direction des cernes. Mais il n'est pas certain qu'elle soit déterminée par l'alternance originelle de cernes de croissance, encore moins qu'elle la reflète fidèlement. Malgré les différentes observations, il n'a pas été possible de trouver de ponctuations suffisamment préservées pour permettre l'identification.

Lames minces dans les bois carbonatisés

L'observation des lames minces de bois pétrifiés collectés dans la marne révèle des modalités variables de minéralisation carbonatée. De plus, la polarisation des structures minérales semble concerner plusieurs phases de minéralisation depuis les précipitations dans les cellules du bois bien préservées, les minces bandes fibreuses périphériques et jusque dans le ciment des fractures (Fig. 6A). Il pourrait s'agir dans ces derniers cas d'une remobilisation plus tardive du processus de minéralisation.

La minéralisation précoce est souvent hyperblastique au niveau des encroûtements, c'est-à-dire que chaque cristal de calcite englobe plusieurs cellules ou trachéides, surtout vers la périphérie des morceaux de bois (Fig. 7A, B) (Buurman 1972). À la périphérie, on observe ainsi des ensembles de cristaux radaxiaux en faisceaux (Figs 6B ; 7B) qui se développent en prenant en écharpe, et en oblitérant ainsi, des structures végétales. Dans ce cas la préservation de ces structures est assez médiocre. Alors que la préservation des structures anatomiques est bonne à l'intérieur des cristaux, elle est mauvaise à leur périphérie et surtout dans la zone de contact. Mais il existe également par endroit des minéralisations oligoblastiques, avec un unique cristal par cellule végétale ou des minéralisations polyblastiques avec plusieurs cristaux disposés en mosaïque au sein d'une cellule. Finalement, la lumière des cellules est le plus souvent comblée par de la sparite avec soit un simple cristal soit une disposition en mosaïque de plus petits cristaux (Fig. 7D). Dans ce cas, la préservation des structures anatomiques est plutôt bonne. La polarisation qui affecte plusieurs remplissages calcitiques des lumières cellulaires peut constituer des plages assez irrégulières comprenant parfois seulement une partie des cristaux sparitiques d'une lumière (Fig. 7C, D).

Dans d'autres cas, notamment à la périphérie des fragments de bois carbonatisés, sont superposées plusieurs bandes concentriques fibroradiées, d'épaisseur d'environ 200 µm, séparées par des discontinuités (Figs 6C, D; 7A, B). Les fibres sont très fines, de diamètre micrométrique. Elles sont soulignées par des lignes brunes qui pourraient correspondre à de la matière organique originelle résiduelle. Par endroits, cet encroûtement se présente sous forme de touffes buissonnantes juxtaposées (Fig. 6E, F), suggérant une croissance de colonies microbiennes dont l'apparence rappelle celle des touffes de certaines cyanobactéries finement filamenteuses (par exemple *Rivularia* C. Agardh ex Bornet & Flahault, 1886, ou *Shizothrix* Kützing ex Gomont, 1892) dont les minéralisations sont fréquentes dans le registre géologique (Freytet & Plaziat 1965 ; Freytet & Plet 1991 ; Caudwell *et al.* 1997 ; Freytet & Verrecchia 1998 ; Freytet 2000 ; Pentecost 2003 ; Hägele *et al.* 2006 ; Sanders *et al.* 2006 ; Arenas & Jones 2007). De la même façon, les croûtes fibreuses pourraient alors correspondre à des feutrages cyanobactériens minéralisés successifs. L'observation des lames minces en lumière polarisée montre des bandes parallèles au sein d'une cristallisation concentrique (Fig. 7E, F). La minéralisation lors de l'épisode « ante-fracturation » ne s'est donc pas faite de manière uniforme, mais là encore elle apparaît surtout hyperblastique.

Certaines fentes au sein du bois ont été remplies d'un ciment sparitique indépendamment et postérieurement à la minéralisation des tissus végétaux (Fig. 7C, D). La totalité de la calcitisation n'est donc pas synchrone et on peut identifier (au moins) deux épisodes de cristallisation de la calcite bien séparés dans le temps.

Fusains et répliques végétales tubulaires du conglomérat

Répliques végétales tubulaires carbonatisées du conglomérat

Le conglomérat contenant les végétaux fossiles se présente sous forme d'une matrice pétrie d'empreintes et répliques tubulaires, de taille et de diamètre très variables, sans orientation préférentielle marquée (Fig. 4A-C). Les périphéries des tubulures y sont structurées radialement. Le cylindre central « vide » des tubulures témoigne de l'emplacement du bois qui a été encroûté, et seul l'encroûtement persiste, sous forme d'une agglomération de cristaux de calcite fibroradiée (Fig. 4A).

La face interne de certaines tubulures montre des remplissages de fentes de dessiccation perpendiculaires à l'axe des structures encroutées, fentes probablement développées à l'origine dans l'axe ligneux qui a disparu.

Fusains des conglomérats

Au sein du conglomérat, avec les structures tubulaires carbonatées, existent parfois des restes de matériel organique carboné, à l'état de lignite vitreux, en massifs anguleux de taille millimétrique à centimétrique, non préservés anatomiquement, mais de type ligneux (Fig. 4B).

Il ne semble pas y avoir de hiatus de préservation entre les différents fragments ligneux observés. Certains fragments millimétriques noirs montrent une collapse des lumières de cellules, une cassure conchoïdale, une texture vitreuse au MEB et un aspect très brillant qui suggèrent un lignite vitreux plutôt que du fusain (Uhl *et al.* 2012). Les fragments centimétriques sont souvent une association de trachéides du type précédent de conservation, et de trachéides préservées en moules internes, et donc « carbonatisées ». L'ensemble des fragments est d'une conservation médiocre et ne per-

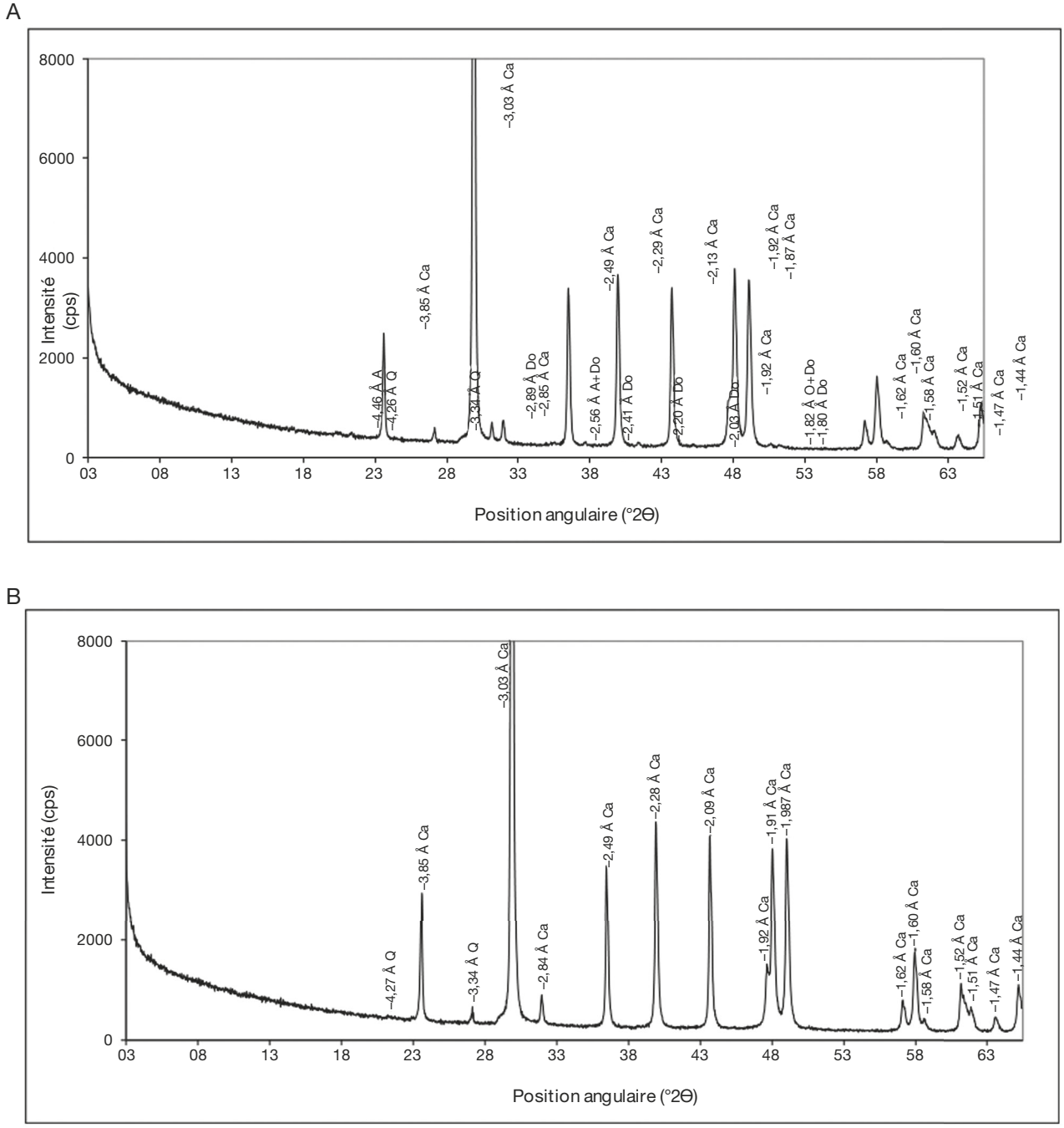


FIG. 5. — Analyse chimique (diffractogramme) des bois fossiles de l'Usine montrant une très faible proportion de dolomie (**Do**), peu de quartz (**Q**) et une prédominance de carbonates (**A**, aragonite ; **Ca**, calcite) tant dans la structure ligneuse du bois fossile (**A**) que dans les sphérules fibroradiées qui l'encroûtent ou comblent ses cavités (**B**).

met que des observations partielles. L'étude xylologique n'a montré qu'un type de structure. Il s'agît d'un trachéidoxyle (Creber 1972) constitué de trachéides et de rayons ligneux (Fig. 8A), à cernes de croissances au bois final limité à 2-3 assises (Fig. 8B), à ponctuation radiale de type araucarien, unisériée (Fig. 8C, D), rarement bisériée et alors alterne (Fig. 8E), les ponctuations aréolées étant contigües, aplaties aux contacts (Fig. 8C). Les champs de croisement sont de type araucarioïde, à nombreux oculipores cupressoïdes alternes contigus (Fig. 8F). Ce type d'anatomie est assignable à *Agathoxylon* Hartig (Philippe 1993). Le matériel ne permet pas suffisamment d'observations pour avoir une vue statistique de la variabilité et tenter d'assigner à une espèce, pour autant que le concept d'espèce dans ce genre de forme soit pertinent. Les observations ne permettent pas de dire que ces bois n'appartiennent pas à *Agathoxylon wallacei* (Knowlton) n. comb. du Purbeckien anglais (basionyme *Araucarioxylon wallacei* Knowlton *in* Ward, 1896 [Ward 1896: 495]). Elles ne permettent pas non plus de les écarter ou de les rapprocher d'une autre espèce. Ce bois ne semble pas différer non plus des

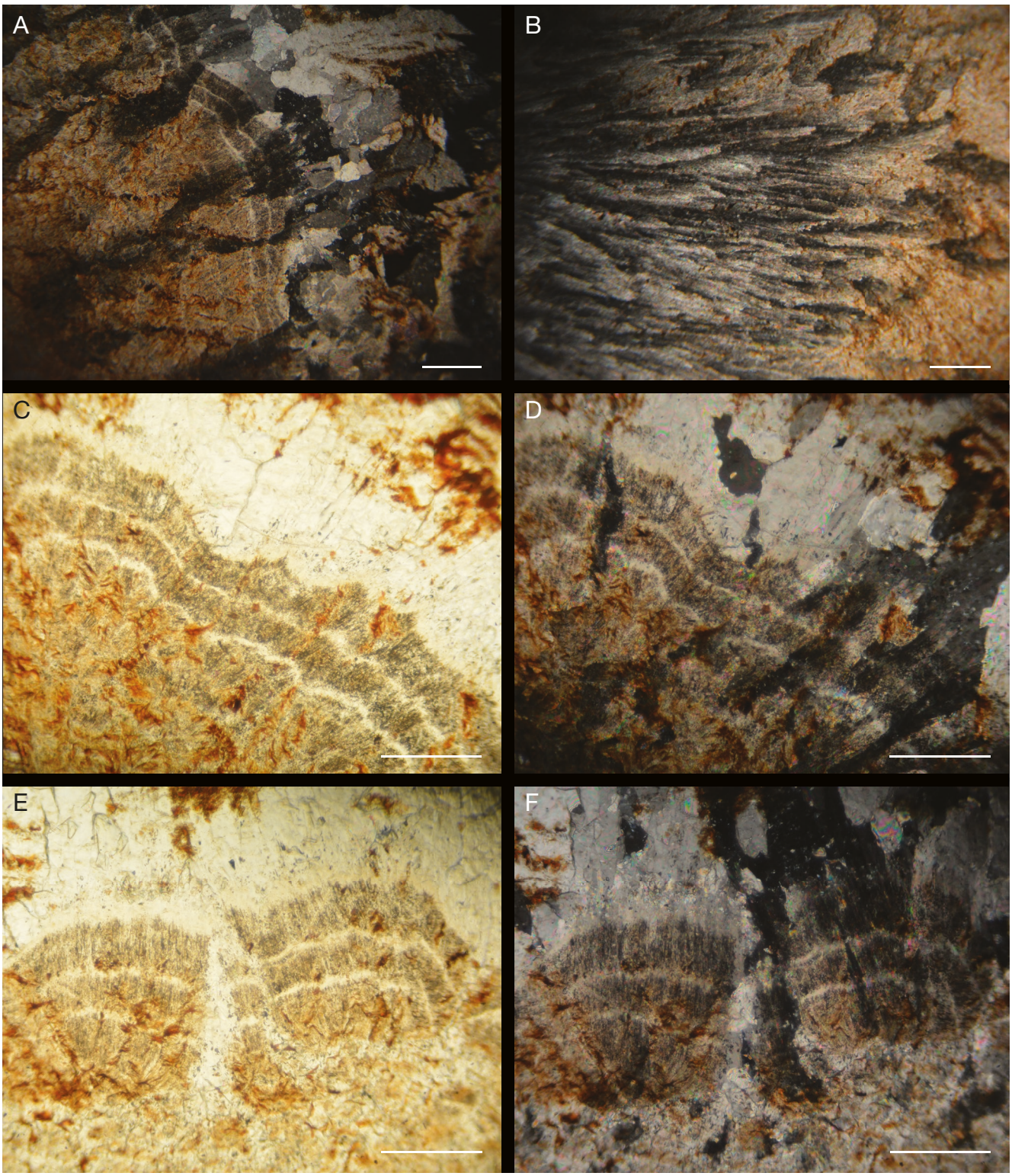


Fig. 6. — Lames minces réalisées dans les bois fossiles du site de l'Usine, à Cherves : **A**, lame mince montrant en lumière polarisée des structures minérales associées à plusieurs phases de minéralisation depuis les précipitations (précoces) dans les cellules du bois bien préservé (à gauche), les minces bandes fibreuses périphériques (au milieu) et jusque dans le ciment (tardif) des fractures (à droite) ; **B**, la minéralisation précoce est souvent hyperblastique au niveau des encroûtements, chaque cristal de calcite englobant plusieurs cellules ou trachéides, surtout vers la périphérie des morceaux de bois où l'on observe ainsi des ensembles de cristaux radaxiaux en faisceaux ; **C**, **D**, à la périphérie des fragments de bois carbonatisés, sont superposées plusieurs bandes concentriques fibroradiées, d'épaisseur d'environ 200 µm, séparées par des discontinuités ; les fibres, très fines, sont soulignées par des lignes brunes qui pourraient correspondre à de la matière organique originelle résiduelle (**C**, lumière naturelle ; **D**, lumière polarisée) ; **E**, **F**, par endroits, l'encroûtement se présente sous forme de touffes buissonnantes juxtaposées, suggérant une croissance de colonies microbiennes dont l'apparence rappelle celle des touffes de certaines cyanobactéries finement filamenteuses ; **C**, lumière naturelle ; **D**, lumière polarisée. Échelles : 0,5 mm.

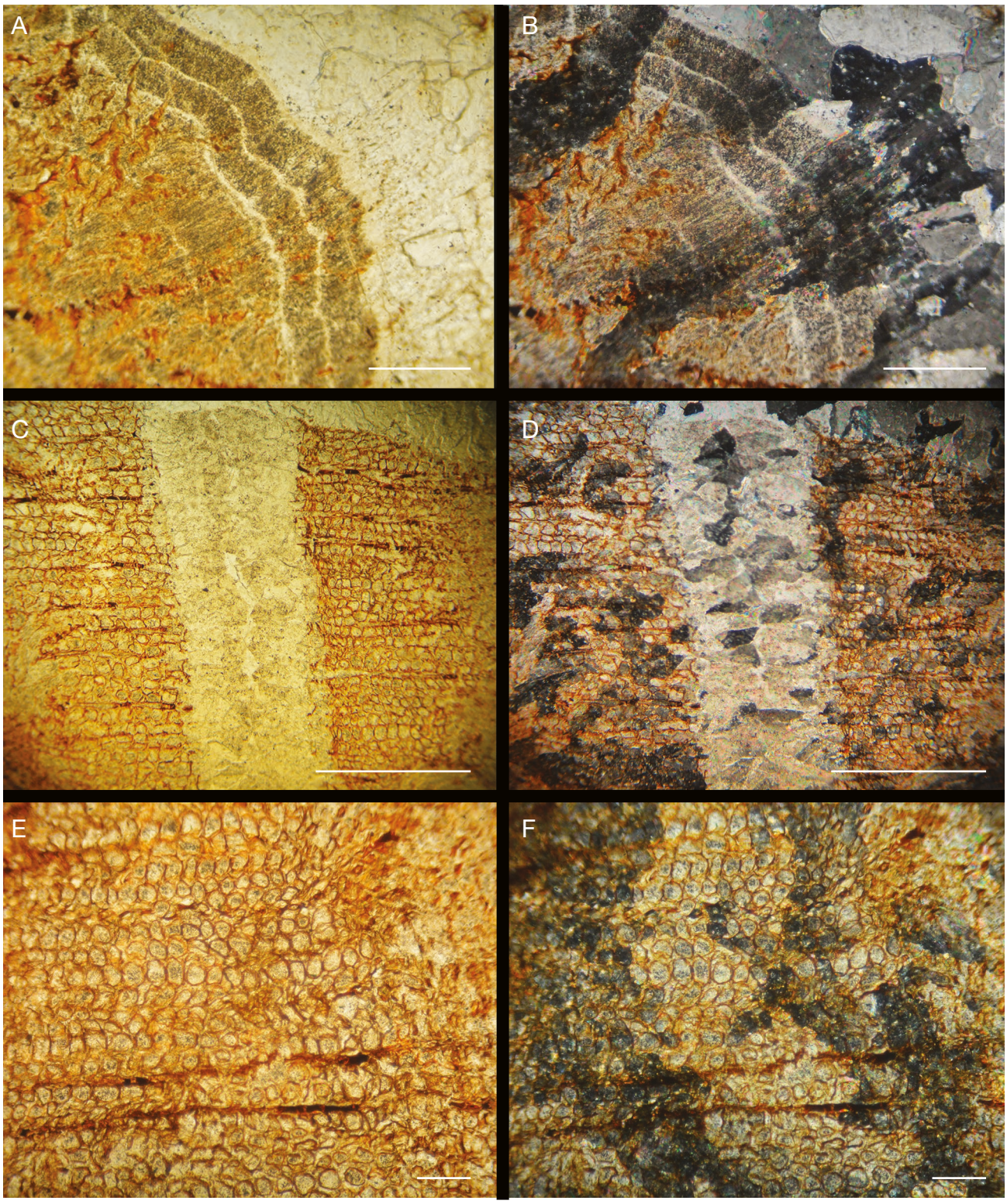


FIG. 7. — Lames minces réalisées dans les bois fossiles du site de l'Usine, à Cherves : **A**, **B**, lame mince montrant en lumière naturelle (**A**) et en lumière polarisée (**B**) la minéralisation hyperblastique du bois, avec une bonne préservation des structures anatomiques à l'intérieur des cristaux, plus mauvaise à leur périphérie et dans la zone de contact ; **C**, **D**, lame mince montrant en lumière naturelle (**C**) et en lumière polarisée (**D**) une cassure qui a fracturé le bois dans un plan tangentiel, postérieure à la première phase de calcitisation du bois, peut-être sous l'influence d'une distorsion diagénétique ; la minéralisation et l'encroutement carbonaté du bois apparaissent ainsi polyphasés ; **E**, **F**, lame mince montrant en lumière naturelle (**C**) et en lumière polarisée (**D**) une zonation concentrique de la minéralisation, qui ne s'est pas faite de manière uniforme, même si elle est là aussi hyperblastique. Échelles : 0,5 mm.

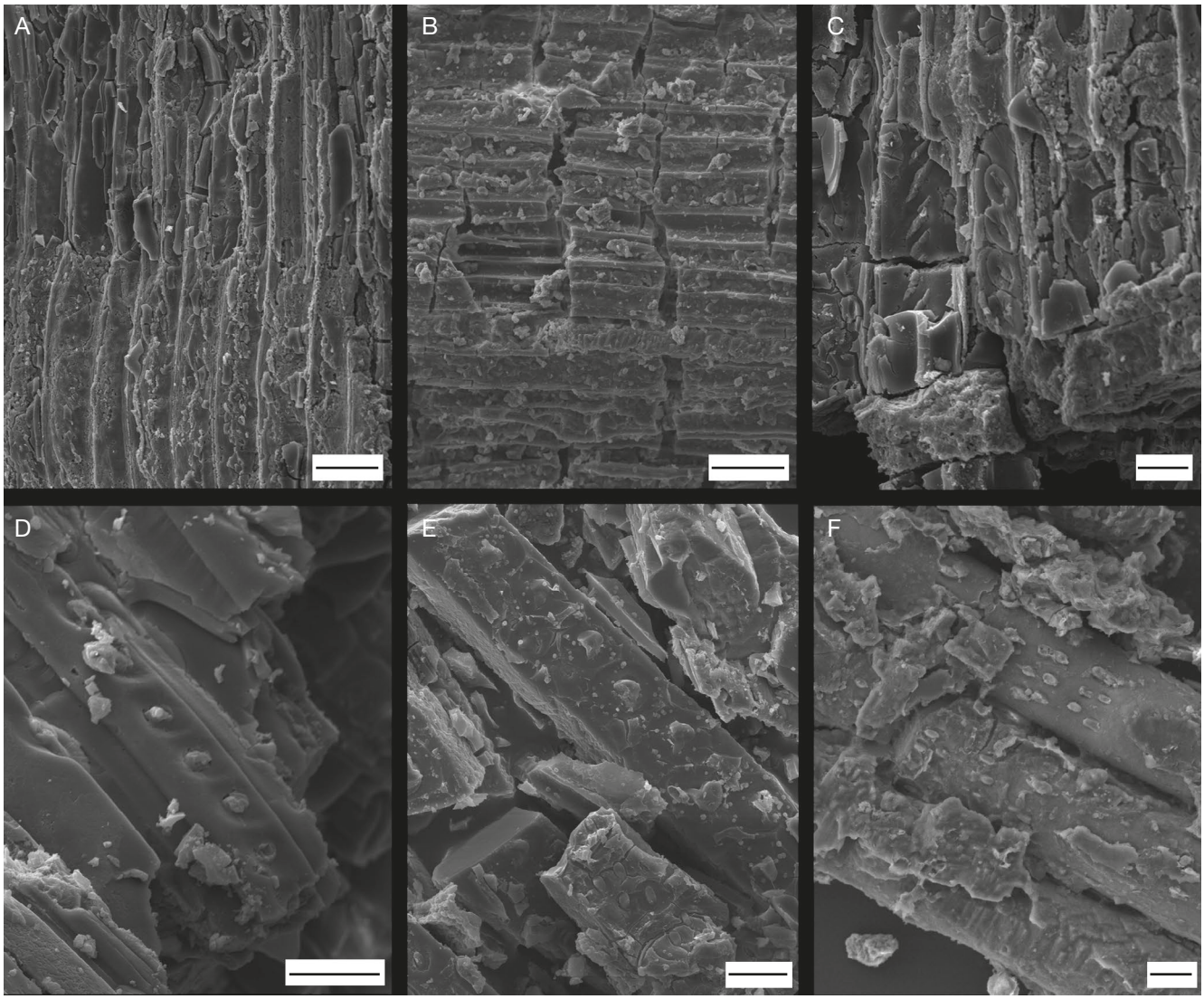


Fig. 8. — Fragments de bois fossiles du site de l'Usine vus au microscope électronique à balayage, avec des structures assignables à *Agathoxylon* Hartig (échantillon MP1954): **A**, trachéidoxyle constitué de trachéides et de rayons ligneux; **B**, cernes de croissances au bois final limité à 2-3 assises; **C**, **D**, ponctuation radiale de type araucarien, unisériée (**C** montre des ponctuations aréolées étant contigües, aplaties aux contacts); **E**, ponctuation radiale bisériée et alors alterne; **F**, champs de croisement de type araucarioïde, à nombreux oculipores cupressoïdes alternes contigus. Échelles: A, B, 50 µm; C-F, 20 µm.

fragments d'*Agathoxylon* non déterminés spécifiquement du Tithonien de Chassiron (Vullo *et al.* 2014) ou du Berriasien de Cherves (carrière Garandeau), ou bien même de l'Albien terminal d'Archingeay-Les Nouillers (Néraudeau *et al.* 2002; Moreau *et al.* 2017a), etc. (cf. supra et Tableau 1). Aucun autre type de macrorestes non ligneux, par exemple de cuticules, n'a été observé dans le faciès argileux à tronc pétrifiés.

DISCUSSION

Datation et stratigraphie du site

La couche à bois fossile de l'Usine est située stratigraphiquement au-dessus de la série berriasienne évaporitique de Cherves (Fig. 3), et sous le Cénomanien discordant. Elle peut être ainsi datée « géométriquement » du Crétacé inférieur. Par ailleurs, la série de l'Usine peut être comparée à la série voisine d'Angeac-Charente, elle aussi située au-dessus des faciès purbeckiens à évaporites de Cherves (Néraudeau *et al.* 2012), et comportant un assemblage fossile comparable mêlant restes de reptiles et de poissons associés à des troncs dans un faciès en partie conglomératique. On peut proposer pour ces deux sites une corrélation à la fois de position stratigraphique et de séquence de dépôt. Angeac étant, dans une fourchette large, d'âge Berriasien supérieur à Valanginien inférieur (Polette *et al.* 2018), on peut assigner à l'Usine une datation comparable.

Par rapport à la coupe de Coquand (1862) (Fig. 3), le conglomérat peut servir de repère. Comme il n'a été retrouvé qu'en surface, avec une abondance de petits blocs, tandis que des troncs carbonatisés imposants sont remontés par les labours, on peut penser que stratigraphiquement le conglomérat se situait au-dessus des marnes à troncs, dont il représentait un niveau de remaniement, et a été plus fragmenté par les engins agricoles.

TABLEAU 2. — Occurrences du genre *Agathoxylon* Hartig, 1848 dans l'Ouest de l'Europe. Lorsqu'un nombre de type « MPxxxx » est fourni comme source, c'est une donnée inédite; quand un nombre est donné entre parenthèses après une localité, il fait référence à un numéro de département français (adapté et complété de Philippe *et al.* 2010).

Source	Localité	Age	Milieu de dépôt
MP1971	Bure (F-55)	Oxfordien inférieur	Marnes marines distales
Philippe *et al.* 2010	Pagny-sur-Meuse (F-55)	Oxfordien supérieur, Zone à *Bifurcatum*	Dépôts en arrière de la ligne de rivage
Philippe *et al.* 2010	Les Pezières (F-01)	Oxfordien supérieur, Zone à *Bifurcatum*	Marnes distales
MP1841	Commercy (F-55)	Oxfordien supérieur, Zone à *Bifurcatum*	Calcaires marins
MP1837	Toul (F-54)	Oxfordien supérieur	Calcaires marins
Philippe *et al.* 2010	Montalieu (F-38)	Oxfordien supérieur, Zone à *Bimmamatum*	Calcaires marins
Garcia *et al.* 1998	Meuilley (F-21)	Oxfordien supérieur	Marin franc
Weidman 1972	Chablais (F-74)	Oxfordien supérieur	Marin franc
Philippe *et al.* 2010	Villerville (F-14)	Kimméridgien supérieur	Marnes distales
Philippe *et al.* 2010	Cap Gris-Nez (F-62)	Tithonien	Marnes
Vullo *et al.* 2014	Île d'Oléron (F-17)	Tithonian basal	Marnes proximales
Francis 1983	Isle of Purbeck (UK)	Tithonien sommital	Paléosol avec calcrète
Schnyder *et al.* 2005	Pointes aux oies (F-62)	Tithonien sommital, Berriasien basal	Dépôts de tsunami
Philippe *et al.* 2010	Wimereux (F-62)	Berriasien basal	Inconnu
Philippe in El Albani *et al.* 2004	Cherves (F-16)	Berriasien	Lagon ou plate-forme interne peu profonde
Ward 1896	Portland (UK)	Berriasien	Non décrit
Néraudeau *et al.* 2012	Angeac-Charente (F-16)	Berriasien, Hauterivien	Dépôts saumâtres ou d'eau douce
This contribution, MP1954	Cherves de Cognac (F-16)	Berriasien	Dépôts d'eau douce proche de l'émersion avec calcrète

ANALYSE PALÉOXYLOLOGIQUE

Le genre *Agathoxylon* est répandu au niveau mondial, depuis au moins le Permien jusqu'au Quaternaire. Il est extrêmement fréquent dans des dépôts sédimentaires de nature variée, de l'Oxfordien terminal au Berriasien, dans toute l'Europe sud-occidentale (Tableau 2 ; Philippe *et al.* 2010).

La nature fragmentaire du matériel existant sur le site de l'Usine, mais surtout aussi la grande homogénéité des espèces fossiles décrites à ce jour, interdit toute identification spécifique réaliste (Philippe 2011). Il semblerait néanmoins, notamment à cause de sa ponctuation radiale très majoritairement unisériée, que le bois de l'Usine diffère de celui usuellement rencontré dans l'Albien terminal – Cénomanien des Charentes et rapporté à *A. gardoniense* Crié (Néraudeau *et al.* 2003), dont la sériation est majoritairement bisériée (Philippe *et al.* 2018). Il n'est pas totalement exclu que cette différence soit due à un déterminisme paléoécologique plutôt que taxonomique. En effet, la sériation est partiellement déterminée par la largeur de la trachéide, elle-même partiellement déterminée par des facteurs climatologiques et pédologiques. Cependant, dans les nombreux assemblages à *A. gardoniense* que nous avons pu observer, l'unisériation était toujours partielle et locale, et donc ici, si le faible effectif n'induit pas de biais, il est probable qu'il s'agisse d'une autre espèce.

La présence d'*Agathoxylon* est intéressante dans ce contexte Purbeckien. En effet dans les niveaux éponymes anglais c'est un autre bois, *Protocupressinoxylon purbeckensis* Francis qui est dominant (Francis 1983). Cette espèce se rencontrait à l'époque sur une large partie de l'Europe occidentale, allant de la péninsule ibérique à la Suisse et l'Angleterre (Philippe *et al.* 2010). *P. purbeckensis* n'est pas exclusif d'*Agathoxylon*, également mentionné dans le Purbeckien anglais, mais les deux taxons se rencontrant préférentiellement dans des assemblages monospécifiques il se pourrait qu'ils soient caractéristiques de phytocénoses différentes. On aurait alors deux marqueurs paléoécologiques qui pourraient être intéressants pour mieux appréhender la paléobiogéographie complexe de la marge ouest-européenne à la limite du Jurassique et du Crétacé.

Il est à remarquer dans ce cadre que les données d'*Agathoxylon* (Tableau 2) de l'Oxfordien supérieur au Kimméridgien proviennent très majoritairement d'environnements franchement marins, alors que par la suite les données sont nettement concentrées en domaine circalittoral à continental. S'il n'est pas dû à un biais dans la surface relative d'affleurements des deux types d'environnements sédimentaires pour chacun des intervalles de temps considérés, ce glissement pourrait marquer l'apparition au Kimméridgien d'un nouveau type de forêt, dominé par *Agathoxylon*, dans un environnement jusqu'alors non colonisé par ce genre. La taphonomie pourrait aider à comprendre l'écologie de ce type de forêt.

LES ENCROÛTEMENTS TUBULAIRES

Les structures tubulaires fibroradiées peuvent correspondre à l'encroûtement d'anciennes racines ou de base d'arbustes ou de bois ayant disparu. Rien ne permet d'identifier clairement des racines, car il faudrait pouvoir observer des ramifications, des variations de diamètre, et des critères pédogénétiques associés, ce qui ne peut être le cas dans la mesure où les tubulures ont été remaniées et fragmentées avant d'être accumulées dans un dépôt subaquatique de type conglomératique. Tout ce que l'on peut dire, c'est qu'il s'agit d'axe ligneux, encroûtés avant leur enfouissement, puis prélevés et transportés par l'eau. Leur

matrice pourrait être un paléosol remanié, mais probablement pas un paléohistosol. Le scénario d'un enfouissement par un sédiment issu du remaniement de sols et de débris végétaux, redéposé et granoclassé, semble plus convaincant. Ces axes verticaux pourraient être des racines, déchaussées puis réenfouies, ou des bases de petits troncs, ou simplement des axes ayant sédimenté verticalement (cas connu dans les dépôts de haute-énergie).

L'action bactérienne ayant présidé aux encroûtements est exprimée par la structure laminée concentrique ou fibroradiée des encroûtements tubulaires, qui rappellent des microbialites comparables à celles-ci, connues à Purbeck autour des bases de troncs (Francis 1984).

La carbonatisation du bois

Processus de minéralisation

Les lames minces montrent une minéralisation des espaces inter- et intracellulaires par de la sparite. Le processus de minéralisation marqué par la cimentation des vides correspondant aux cellules végétales est souvent évoqué sous le terme de perminéralisation (Uhl & Lepper 2006 ; Sweeney *et al.* 2009 ; Sanders *et al.* 2010 ; Bardet & Pournou 2015, 2017). La perminéralisation survient ainsi lorsque les fluides chargés en éléments minéraux pénètrent dans les interstices à l'intérieur d'un organisme (parfois au niveau cellulaire), entraînant une précipitation en comblant ces espaces. Cependant, Mustoe (2017) recommande de n'utiliser que le terme général de minéralisation, notamment dans le cas de carbonatisation, compte tenu de la complexité des phénomènes en jeu. Buurman (1972) a théorisé les processus de minéralisation en silice d'un végétal avec quatre différents degrés : 1) polyblastique : plusieurs cristaux dans l'espace d'une cellule ; 2) oligoblastique : un cristal remplissant chaque cellule ; 3) hyperblastique : des monocristaux remplissant un certain nombre de cellules en se développant à travers les parois cellulaires ; et 4) idioblastique : des cristaux bien formés dans n'importe quelle partie du bois. Ce concept, jusqu'à présent peu appliqué aux phénomènes de calcitisation, a été repris par quelques auteurs (Francis 1983 ; Jefferson 1987 ; Matysová & Grygar 2009 ; Mencl *et al.* 2009) qui notent que, dans le cadre d'un processus de silicification, la minéralisation hyperblastique est indépendante des structures végétales et engendre donc une moins bonne conservation rejoignant ainsi les constatations de Buurman (1972) et Simon (1978). L'examen des lames minces montre que les trois premiers degrés de minéralisation semblent coexister. Ainsi la précipitation polyblastique et oligoblastique des ciments à l'intérieur des vides cellulaires a mieux préservé les structures végétales que dans le cas de minéralisations intracellulaires développées sous forme de calcite fibroradiée à la texture « pop corn-like » (Mustoe & Beard 2021) qui produisent une distorsion anatomique. Au final la pétrification observée intéresse tant les parois des cellules remplacées en partie par des oxydes de fer et formant l'ossature des trachéides que la précipitation dans les lumens. Des cas comparables de pétrification ont été décrits pour des bois de conifères dans des lacs de sources minérales riches en calcium et fer (Nowak *et al.* 2007).

Un autre aspect de la minéralisation des restes végétaux résulte du degré de dégradation, en général microbienne, du bois. La minéralisation progressive peut être favorisée par cette biodégradation et l'accompagner (Sweeney *et al.* 2009 ; Mustoe 2015). La porosité engendrée favorise la précipitation dans les espaces vides. Ainsi, au cours de la diagenèse, les fluides chargés en éléments minéraux, ici en calcium, sont facilement absorbés par les trachéides et transmis de cellule en cellule. La perminéralisation résultante peut reproduire l'anatomie cellulaire avec une grande fidélité (Mustoe 2015). De tels indices de dégradation sont notamment présents dans les restes de bois de l'Usine.

L'hétérogénéité au niveau de la taille des cristaux (Fig. 7A-D), conjuguant des petits et des gros cristaux de calcite, plaide pour un premier épisode de croissance cristalline continue lors de l'enfouissement. Au final, ces structures évoquent une minéralisation précoce du bois, soit en surface, lors d'un début d'enfouissement, soit en sub-surface (sous faible profondeur de sédiment), suite à la circulation de fluides riches en $CaCo_3$, avec un environnement immédiat carbonaté et propice à une activité microbienne (contexte microbialitique). Les teintes brunes de certaines microstructures, vues en lame mince, sont essentiellement dues à des résidus de matière organique originelle, mais des oxydes de fer, rouges ou ocres, plus tardifs que les carbonates témoignent de la circulation de fluides oxydants, après la calcitisation en milieu réducteur, car ils traversent les zones carbonatées (Fig. 7A, B, E, F).

Les sites connus à bois carbonatisés

Après la silicification, la carbonatisation est la forme la plus fréquente de pétrification du bois (Greenland 1918 ; Scott & Collinson 2003 ; Mustoe 2018). Les bois carbonatisés sont ainsi assez bien connus dans des séries sédimentaires d'âges géologiques assez variés (Higgins 1960 ; Buurman 1972 ; Marynowski *et al.* 2007 ; Mustoe 2018 ; Mustoe & Beard 2021). Mustoe (2018), puis Mustoe & Beard (2021), ont ainsi récemment recensé 14 sites à bois carbonatisé s'échelonnant du Jurassique au Pléistocène. En ce qui concerne les bois carbonatisés du Jurassique terminal un unique gisement est connu en Pologne (Siurek *et al.* 2004). Pour le Crétacé, Buurman (1972), dans la première véritable synthèse sur les différents types de minéralisation des bois fossiles, mentionnait déjà avoir étudié un échantillon provenant des faciès wealdiens de l'Isle de Wight, en Angleterre. Mais les travaux de Mustoe (Mustoe 2018 ; Mustoe & Beard 2021) élargissent l'inventaire en listant des bois carbonatisés crétacés du Canada et du Kansas, en plus de celui de l'Île de Wight.

Carbonatisation et action microbienne

Les bois calcitisés crétacés du Canada sont souvent au cœur de larges concrétions nodulaires, le bois en constituant le nucléus (Mustoe & Beard 2021), alors que ceux du site de l'Usine présentent des encroûtements non nodulaires, moins épais et moins généralisés. Dans le premier cas, la minéralisation de la concrétion correspond à la croissance de couches concentriques. Dans le deuxième cas, les concrétions autour du matériel végétal sont caractérisées par le développement de

sphérules calcitiques à structure cristalline fibreuse et radiale de taille millimétrique à centimétrique radiale (texture « pop corn-like », Mustoe & Beard 2021: fig. 10A). La calcitisation des bois de l'Usine, tout comme celle des bois étudiés par Mustoe & Beard (2021) dans le Crétacé inférieur du Canada, possède l'aspect progressif et concentrique de la calcitisation.

Dans les deux cas, il faut sans doute envisager un processus de calcitisation engendré par une action microbienne (microbialitique *sensu lato*). En effet, la décomposition de la matière organique provoquée par l'action des bactéries peut entraîner une production de gaz carbonique qui favorise la précipitation de carbonate de calcium (Mustoe & Beard 2021). D'autre part, la croissance de sphérules calcitiques dans des encroûtements carbonatés est souvent reliée à une cause microbienne en relation avec des biofilms et/ou la production d'EPS (extracellular polymeric substances), comme cela a été testé en laboratoire (Pedley *et al.* 2009) ou supposé pour des sphérules du Purbeckien anglais (Kirkham & Tucker 2018).

Carbonatisation et préservation exceptionnelle

Mustoe (2018) note que les bois carbonatisés préservent parfois mieux les tissus végétaux que la silicification. Ici la préservation des cellules est localement assez bonne pour conserver les détails caractéristiques de la ponctuation, alors qu'ailleurs elle est déficiente, à cause d'une recristallisation. Une bonne préservation est aussi remarquée pour les fragments de bois perminéralisés dans les calcaires des sources dites « pétrifiantes » (Sanders *et al.* 2010). Un autre type de carbonatisation est la sidéritisation, qui donne parfois des préservations excellentes (Marynowski *et al.* 2007), tant au niveau moléculaire qu'à celui de l'anatomie des bois. La calcitisation a donc participé efficacement à la fossilisation du bois, tant pour la qualité de préservation des structures cellulaires que pour assurer une bonne solidité des restes végétaux. Ce processus naturel a d'ailleurs inspiré des expériences de calcifications artificielles de bois pour développer un matériau hybride utile dans le domaine de la construction (Merk *et al.* 2015).

Interprétation taphonomique et paléoenvironnementale

Comme sur le site proche (#25 km) et sub-contemporain d'Angeac-Charente (Néraudeau *et al.* 2012), la situation paléogéographique marginale et l'absence de dépôts silicoclastiques, et a fortiori de quartz roulés, semble exclure un contexte fluvial. La nature conglomératique polygénique avec éléments roulés suggérerait le remaniement d'un cordon littoral marin lors d'un épisode de tempête et une sédimentation brutale dans une lagune côtière, soumise annuellement à des épisodes de dessiccation marqués. Les fragments ligneux seraient ainsi issus des laisses de mer, les gros troncs de lagans. Le faciès conglomératique à bois est constitué de galets, de graviers et micrograviers carbonatés, issus de l'érosion du Jurassique calcaire sous-jacent (Tithonien), sans sable siliceux, ce qui plaide pour un apport sédimentaire essentiellement issu de la plate-forme carbonatée.

La coexistence de petits débris ligniteux et de gros troncs associés à des éléments pédogénétiques est assez fréquente dans le Mésozoïque français (Philippe 1991), notamment dans des dépôts de tempête (Myrow & Southard 1996 ; Hatem *et al.* 2016). Des dépôts de tsunami non sans ressemblances sont connus dans le Tithonien terminal du Boulonnais (Schnyder *et al.* 2005).

Les rosettes de cristaux de calcite, vraisemblablement liées à une activité microbialitique, corroboreraient un dépôt dans une lagune soumise à des épisodes d'intense dessiccation (Francis 2000). L'imprégnation des bois par des oxydes de fer serait liée à des circulations plus tardives, mais pas nécessairement lors des phases d'exondation (Spicer 1991). À noter que de telles sphérules calcitiques fibroradiées, de taille millimétrique, ont été interprétées comme d'origine bactérienne par Richmond *et al.* (2021: fig. 9B, C).

La préservation différentielle des éléments ligneux selon leur taille est également une observation commune. Ainsi par exemple dans la formation Phu Kradung du groupe Khorat en Thaïlande, on retrouve de même des petits éléments ligniteux ou fusinisés quand les gros axes sont minéralisés (Philippe *et al.* 2004). Il est possible que l'activité microbienne, maximale sur les grosses masses de matière organique, ait drainé vers elles le maximum de minéraux solubles lors de la diagénèse, ou favorisé leur cristallisation à ce niveau par ses productions.

Tous les fragments ligneux observés ont été altérés à l'échelle cellulaire, probablement par une attaque microbiologique. Comme les bois altérés sont mécaniquement fragiles, il est très probable qu'ils aient été attaqués après leur dépôt. Leur taille aurait permis aux plus gros axes de mieux résister à un début de pédogénèse sous climat chaud. La vitrification partielle des fragments ligniteux est favorisée en contexte chaud et acide (Gerards 2007).

Le dernier stade taphonomique, celui de la minéralisation, est difficile à dater. La carbonatisation peut être intervenue peu après l'enfouissement. La très faible présence de quartz détectée en géochimie peut témoigner d'une phase plus tardive puisque l'encaissant est pauvre en silice. La série purbeckienne est coiffée ponctuellement par les sables du Cénomanien basal qui ont pu jouer le rôle de «réservoir» à silice et contribuer à la silicification du Jurassique terminal, dans une phase d'altération et de lessivage-reprécipitation très postérieure à la diagenèse initiale du faciès à bois. Régionalement cette phase de silicification est bien connue à l'Éocène et a affecté tous les faciès des sommets topographiques de l'époque, qu'ils soient jurassiques ou crétacés (Rioult 1967 ; Philippe *et al.* 2018).

La taphonomie ne permet donc pas de préciser la paléoécologie des formations productrices des troncs et fragments ligneux de type *Agathoxylon* à partir du Kimméridgien, et celles-ci pourraient aussi bien être circalittorales que nettement continentales. Il faut espérer que la poursuite des travaux permettra d'identifier des dépôts parautochtones et ainsi de préciser la paléoécologie relative des deux types de formations forestières purbeckiennes.

Mustoe (2018) rappelle que, alors que si la silicification du bois est un processus de minéralisation qui intervient dans des conditions de pH faible (milieu acide), la calcitisation est

quant à elle plutôt typique d'un contexte à pH fort (milieu alcalin). L'auteur note également un autre aspect de la calcitisation que l'on retrouve dans les bois fossiles de l'Usine, à savoir la rareté de la dolomite dans les bois calcitisés (Fig. 5), ce qu'il met en relation avec le fait que même dans un contexte riche en Mg dissout, la dolomite ne précipite qu'à des températures importantes, comme l'avait montré Hardie (1987). Cela signifie donc que la calcitisation des bois de l'Usine s'est faite sous des températures chaudes modérées, et non lors d'un extremum chaud.

La calcitisation du bois est connue tant en domaine continental qu'en domaine marin côtier (Higgins 1960 ; Mustoe & Beard 2021). L'absence dans le conglomérat calcaire de l'Usine de reste coquilliers d'invertébrés et la présence de microrestes de poissons *Lepidotes* tout comme de galets d'os reptiliens (possiblement de sauropodes vu leur taille) plaident pour un milieu de dépôt continental ou margino-littoral. Toutefois, aucun reste de charophyte n'a été récolté dans les dépôts argileux associés au bois. Il est à noter que l'énergie de dépôt était probablement forte lors de la genèse des conglomérats, mais beaucoup plus faible lors du dépôt des marnes sous-jacentes à portions métriques de troncs et tronçons de branches.

Remerciements

Les auteurs remercient Joël Drochon, qui a découvert le site en 1970 et a été à l'initiative de cette étude. Ils sont également très reconnaissants à Marie-Odile Fallourd, propriétaire du site, pour son accueil, sa bienveillance et ses autorisations de fouilles dans les argiles à troncs fossiles. Un grand merci également à Xavier Le Coz (Université de Rennes I) qui a réalisé les lames minces dans les bois carbonatisés, et à Romain Vullo pour son expertise sur les restes de vertébrés associés aux bois. Anaïs Boura et un rapporteur anonyme sont également remerciés pour leurs relectures attentives.

RÉFÉRENCES

Allain R., Vullo R., Le Loeuff J. & Tournepiche J.-F. 2014. — European ornithomimosaurs (Dinosauria, Theropoda): an undetected record. *Geologica Acta* 12: 127-135. https://doi.org/10.1344/105.000002083

Arenas C. & Jones B. 2007. — Temporal and environmental significance of microbial lamination: insight from Recent fluvial stromatolites in the River Piedra, Spain. *Sedimentology* 64: 1597-1629. https://doi.org/10.1002/mrc.4143

Bardet M. & Pournou A. 2015. — Fossil wood from the Miocene and Oligocene epoch: chemistry and morphology. *Magnetic Resonance in Chemistry* 53: 9-14.

Bardet M. & Pournou A. 2017. — NMR Studies of Fossilized Wood, *in* Webb G. A. (ed.), *Annual Reports of NMR Spectroscopy.* Elsevier: 41-83. https://doi.org/10.1016/bs.arnmr.2016.07.002

Benoît R.-A., Néraudeau D. & Martín-Closas C. 2017. — A review of the Late Jurassic-Early Cretaceous charophytes from the northern Aquitaine Basin in south-west France. *Cretaceous Research* 79: 199-213. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2017.07.009

Bourgueil B., Hantzpergue P. & Moreau P. 1986. — Notice explicative de la feuille Matha à 1/50 000. Carte géologique de la France à 1/50 000 n°684. BRGM éd., Orléans, 25 p.

Buffetaut E., Pouit D., Rigollet L. & Archambeau 1989. — Poissons et reptiles continentaux du Purbeckien de la région de Cognac (Charente). *Bulletin de la Société géologique de France* 5: 1065-1069. https://doi.org/10.2113/gssgfbull.V.5.1065

Buurman P. 1972. — Mineralization of fossil wood. *Scripta Geologica* 12: 1-43.

Caudwell A., Lang J. & Pascal A. 1997. — Études expérimentales de la lamination des stromatolithes à *Rivularia haematites* en climat tempéré : édification des lamines micritiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 324, série IIa: 883-890. https://doi.org/10.1016/S1251-8050(97)82501-3

Colin J.-P., El Albani A., Fursich F. T., Martín -Closas C., Mazin J.-M. & Billon-Bruyat J.-P. 2004. — Le gisement « Purbeckien » de vertébrés de Cherves-de-Cognac, Charente (SW France) : nouvelles données biostratigraphiques. *Comptes Rendus Palevol* 3 (1): 9-16. https://doi.org/10.1016/j.crpv.2003.09.013

Coquand H. 1858. — Description géologique de l'étage purbeckien dans les deux Charentes. *Bulletin de la Société géologique de France,* série 2, 15: 577-620. https://www.biodiversitylibrary.org/page/54405267

Coquand H. 1862. — *Description physique, géologique, paléontologique et minéralogique du département de la Charente*. Barlatier-Feissat & Demonchy, Marseille, 420 p. https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6103017n

Creber G. T. 1972. — Gymnospermous wood from the Kimmeridgian of East Sutherland and from Sandringham Sands of Norfolk. *Palaeontology* 15: 655-661.

El Albani A., Fürsich F. T., Colin J.-P., Meunier A., Hochuli P., Martín-Closas M., Mazin J.-M. & Billon-Bruyat J.-P. 2004. — Palaeoenvironemental reconstruction of the basal Cretaceous vertebrate bearing beds in the northern part of the Aquitaine Basin (SW France): sedimentological and geochemical evidence. *Facies* 50: 195-215. https://doi.10.1007/s10347-004-0017-6

Francis J. E. 1983. — The dominant conifer of the Jurassic Purbeck Formation, England. *Palaeontology* 26: 277-294.

Francis J. E. 1984. — The seasonal environment of the Purbeck (Upper Jurassic) fossil forests. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 48: 285-307. https://doi.org/10.2307/3515438

Francis J. 2000. — Unusual Preservation of Silicified Wood by Quartzine from the Jurassic Purbeck Formation, *in* 11th Plant Taphonomy Meeting. Barcelona, 11 November 2000, 1 p.

Freytet P. 2000. — Distribution and paleoecology of a non marine algae and stromatolites: II, the Limagne of Allier Oligo-Miocene lake (Central France). *Annales de Paléontologie* 86: 195-241. https://doi.10.1016/s0753-3969(00)88723-6

Freytet P. & Plaziat J.-C. 1965. — Importance des constructions algaires dues à des Cyanophycées dans les formations continentales du Crétacé supérieur et de l'Éocène en Languedoc. *Bulletin de la Société géologique de France,* série 7, 7 (5): 679-694. https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-VII.5.679

Freytet P. & Plet A. 1991. — Les cristallisations de calcite associées à des restes de végétaux (algues, feuilles) en milieu fluviatile et lacustre, actuel et ancien (tufs et travertins). *Bulletin de la Société botanique de France* 139: 69-74 (actualités botaniques). https://doi.org/10.1080/01811789.1992.10827089

Freytet P. & Verrecchia E. 1998. — Freshwater organisms that build stromatolites: a synopsis of biocrystallization by prokaryotic and eukaryotic algae. *Sedimentology* 45: 535-563. https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1998.00155.x

Garcia J.-P., Philippe M. & Gaumet F. 1998. — Fossil wood in Middle-Upper Jurassic marine sedimentary cycles of France: relations with climate, sea-level dynamics, and carbonate-platform environments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 141: 199-214. https://doi.org/10.1016/s0031-0182(98)00055-8

Gerards T. 2007. — *Étude des végétaux des sédiments à faciès wealdiens du bassin de Mons*. Thèse de doctorat, Université de Liège, 221 p. (inédit).

GÔNET J., ROZADA L., BOURGEAIS R. & ALLAIN R. 2018. — Taphonomic study of a pleurosternid turtle shell from the Early Cretaceous of Angeac-Charente, southwest France. *Lethaia* 52: 232-243. https://doi.org/10.1111/let.12309

GREENLAND C. W. 1918. — The replacement of wood by calcite. *Economic Geology* 13: 116-119. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.13.2.116

HÄGELE D., LEINFELDER R., GRAU J., BURMEISTER E. G. & STRUCK U. 2006. — Oncoids from the river Alz (southern Germany): Tiny ecosystems in a phosphorus-limited environment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 237: 378-395. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.12.016

HARDIE L. A. 1987. — Dolomitization, a critical view of some current views. *Journal of Sedimentary Research* 57: 166-183. https://doi.org/10.1306/212F8AD5-2B24-11D7-8648000102C1865D

HATEM E., TRIBOVILLARD N., AVERBUCH O., SANSJOFRE P., ADATTE T., GUILLOT F., ADER M. & VIDIER D. 2016. — Early diagenetic formation of carbonates in a clastic-dominated ramp environment impacted by synsedimentary faulting-induced fluid seepage – Evidence from the Late Jurassic Boulonnais Basin (N France). *Marine and Petroleum Geology* 72: 12-29. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.01.010

HIGGINS C. G. 1960. — Calcification of some California Cretaceous wood. *Geological Society of America Bulletin* 71: 1887-1888.

JEFFERSON T. H. 1987. — The preservation of conifer wood: examples from the Lower Cretaceous of Antarctica. *Palaeontology* 30: 233-249.

KIRKHAM A. & TUCKER M. 2018. — Thrombolites, spherulites and fibrous crusts (Holkerian, Purbeckian, Aptian): Context, fabrics and origins. *Sedimentary Geology* 374: 69-84. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.07.002

LE LOEUFF J., BUFFETAUT E. & MERSER C. 1996. — Découverte d'un dinosaure sauropode tithonien dans la région de Cognac (Charente). *Géologie de la France* 2: 79-81.

MANÈS M. 1850. — Note sur les dépôts de gypse des départements de la Charente et de la Charente-Inférieure. *Bulletin de la Société géologique de France,* série 2, 7: 605-613. https://www.biodiversitylibrary.org/page/54384216

MARYNOWSKI L., OTTO A., ZATON M., PHILIPPE M. & SIMONEIT B. 2007. — Biomolecules preserved in 168 million year old fossil conifer wood. *Naturwissenschaften* 94: 228-236. https://doi.org/10.1007/s00114-006-0179-x

MATYSOVÁ P. & GRYGAR T. 2009. — Permian Silicified Wood in Oman. *Al Hajar* 15: 14-18.

MAZIN J.-M., BILLON-BRUYAT J.-P., POUECH J. & HANTZPERGUE, P. 2006. — The Purbeckian site of Cherve-de-Cognac (Berriasian, Early Cretaceous, southwest France): a continental ecosystem accumulated in an evaporitic littoral depositional environment. *Proceedings of Mesozoic Terrestrial Ecosystems* 2006: 84-88.

MENCL V., MATYSOVA P. & SAKALA J. 2009. — Silicified wood from the Czech part of the Intra Sudetic Basin (Late Pennsylvanian, Bohemian Massif, Czech Republic): systematics, silicification and palaeoenvironment. *Neues Jarhburg für Geologie ünd Paläontologie* 252: 269-288. https://doi.org/10.1127/0077-7749/2009/0252-0269

MERK V., CHANANA M., KEPLINGER T., SABYASACHI G. & BURGERT I. 2015. — Hybrid wood materials with improved fire retardance by-bioinspired mineralisation on the nano- and submicron level. *Green Chemistry* 17: 1423-1428. https://doi.org/10.1039/C4GC01862A

MOORE D. M. & REYNOLDS R. C. Jr 1997. — *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. 2nd ed. Oxford University Press, New York, 378 p.

MOREAU J.-D., NÉRAUDEAU D., PHILIPPE M. & DÉPRÉ É. 2017a. — Albian flora from Archingeay-Les Nouillers (Charente-Maritime): comparison and synthesis of Cretaceous meso- and macro-remains from the Aquitaine Basin (southwestern France). *Geodiversitas* 39 (4): 729-740. https://doi.org/10.5252/g2017n4a5

MOREAU J.-D., NÉRAUDEAU D., VULLO R., ABIT D., MENNECART B. & SCHNYDER J. 2017b. — Late Jurassic dinosaur footprints from Chassiron-La Morelière (Oléron Island, western France). *Palaeobiology and Palaeoenvironments* 97: 773-789. https://doi.org/10.1007/s12549-017-0282-3

MUSTOE G. E. 2015. — Late Tertiary petrified wood from Nevada, USA: Evidence for multiple silicification pathways. *Geosciences* 5: 286-309. https://doi.org/10.3390/geosciences5040286

MUSTOE G. E. 2017. — Wood Petrifaction: A New View of Permineralization and Replacement. *Geosciences* 7 (4): 119. https://doi.org/10.3390/geosciences7040119

MUSTOE G. E. 2018. — Mineralogy of non-silicified fossil wood. *Geosciences* 8 (85): 1-32. https://doi.org/10.3390/geosciences8030085

MUSTOE G. E. & BEARD G. 2021. — Calcite-Mineralized Fossil Wood from Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Geosciences* 11 (38): 1-16. https://doi.org/10.3390/geosciences11020038

MYROW P. M. & SOUTHARD J. B. 1996. — Tempestite deposition. *Journal of Sedimentary Research* 66 (5): 875-887. https://doi.org/10.1306/D426842D-2B26-11D7-8648000102C1865D

NÉRAUDEAU D., PERRICHOT V., DEJAX J., MASURE E., NEL A., PHILIPPE M., MOREAU P., GUILLOCHEAU F. & GUYOT T. 2002. — Un nouveau gisement à ambre insectifère et à végétaux (Albien terminal probable) : Archingeay (Charente-Maritime, France). *Geobios* 35: 233-240. https://doi.org/10.1016/S0016-6995(02)00024-4

NÉRAUDEAU D., ALLAIN R., PERRICHOT V., VIDET B., BROIN F. DE, GUILLOCHEAU F., PHILIPPE M., RAGE J.-C. & VULLO R. 2003. — Découverte d'un dépôt paralique à bois fossiles, ambre insectifère et restes d'Iguanodontidae (Dinosauria, Ornithopoda) dans le Cénomanien inférieur de Fouras (Charente-Maritime, sud-ouest de la France). *Comptes Rendus Palevol* 2: 221-230. https://doi.org/10.1016/S1631-0683(03)00032-0

NÉRAUDEAU D., ALLAIN R., BALLÈVRE M., BATTEN D. J., BUFFETAUT E., COLIN J.-P., DAVIERO-GOMEZ V., EL ALBANI A., GOMEZ B., GROSHENY D., LE LŒUFF J., LEPRINCE, MARTÍN-CLOSAS C., MASURE E., MAZIN J.-M., PHILIPPE M., POUECH J., TONG H., TOURNEPICHE J.-F. & VULLO R. 2012. — The Hauterivian–Barremian lignitic bone bed of Angeac (Charente, south-west France): stratigraphical, palaeobiological and palaeogeographical implications. *Cretaceous Research* 37: 1-14. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2012.01.006

NOWAK J., NOWAK D., CHEVALIER P., LEKKI J., VAN GRIEKEN R. & KUCZUMOW A. 2007. — Analysis of composite structure and primordial wood remains in petrified wood. *Applied Spectroscopy* 61 (8): 889-895. https://doi.org/10.1366/000370207781540141

PEDLEY M., RIGERSON M. & MIDDLETON R. 2009. — Freshwater calcite precipitates from in vitro mesocosm flume experiments: a case for biomediation of tufas. *Sedimentology* 56: 511-527. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.00983.x

PENTECOST A. 2003. — Cyanobacteria associated with hot spring travertines. Canadian *Journal of Earth Sciences* 40 (11): 1447-1457. https://doi.org/10.1139/e03-075

PHILIPPE M. 1991. — *Bois fossiles du Jurassique de Franche-Comté*. Thèse de Doctorat, Université Lyon-I, 235 p.

PHILIPPE M. 1993. — Nomenclature générique des trachéidoxyles mésozoïques à champs araucarioïdes. *Taxon* 42 (1): 74-80. https://doi.org/10.2307/1223305

PHILIPPE M. 2011. — How many species of *Araucarioxylon*? *Comptes Rendus Palevol* 10: 201-208. https://doi.org/10.1016/j.crpv.2010.10.010

PHILIPPE M., SUTEETHORN V., LUTAT P., BUFFETAUT E., CAVIN L., CUNY G. & BARALE G. 2004. — Stratigraphical and palaeobiogeographical significance of fossil wood from the Mesozoic Khorat Group of Thailand. *Geological Magazine* 141: 319-328. https://doi.org/10.1017/S0016756803008604

PHILIPPE M., GOMEZ B., GIRARD V., COIFFARD C., DAVIERO-GOMEZ, V., THÉVENARD F., BILLON-BRUYAT J.-P., GUIOMAR M., LATIL J.-L., LE LOEUFF J., NÉRAUDEAU D., OLIVERO D . & SCHLÖGL J. 2008. — Woody or not woody? Searching for first angiosperm wood in the Early Cretaceous of Europe. *Palaeoworld* 17: 142-152. https://doi.org/10.1016/j.palwor.2008.06.001

PHILIPPE M., BILLON-BRUYAT J.-P., GARCIA-RAMOS J. C., BOCAT L., GOMEZ B. & PIÑUELA L. 2010. — New occurrences of the wood *Protocupressinoxylon purbeckensis* Francis: implications for terrestrial biomes in South-western Europe at the Jurassic/Cretaceous boundary. *Palaeontology* 53: 201-214. https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2009.00926.x

PHILIPPE M., RIOULT J.-P., RIOULT M. & THÉVENARD F. 2018. — A reappraisal of Lignier's Mesozoic fossil wood collection: ages, nomenclature and taxonomy. *Review of Palaeobotany and Palynology* 252: 10-19. https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2018.02.001

PLATEL J.-P. 1980. — *Le bassin gypsifère des Charentes – Synthèse des données géologiques sur le Purbecko-Wealdien – Proposition d'une méthodologie de prospection par approche géophysique*. Rapport BRGM 80 SGN 313 POC, 78 p.

POLETTE F. 2019. — *Les assemblages palynologiques continentaux du Crétacé Inférieur de France (Tithonien-Cénomanien) : paléoenvironnements, paléoclimats, stratigraphie, et taxonomie*. Thèse de doctorat, Université de Rennes, 592 p. (inédit).

POLETTE F., BATTEN D. J. & NÉRAUDEAU D. 2018. — Re-examination of the palynological content of the Lower Cretaceous deposits of Angeac, Charente, south-west France: age, palaeoenvironment and taxonomic determinations. *Cretaceous Research* 90: 204-221. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2018.04.017

POUECH J., MAZIN J.-M. & BILLON-BRUYAT J.-P. 2006. — Microvertebrate biodiversity from Cherves-de-Cognac (Lower Cretaceous, Berriasian: Charente, France). *Proceedings of Mesozoic Terrestrial Ecosystems*: 96-100.

POUECH J., AMIOT R., LÉCUYER C., MAZIN J.-M., MARTINEAU F. & FOUREL F. 2014. — Oxygen isotope composition of vertebrate phosphates from Cherves-de-Cognac (Berriasian, France): environmental and ecological significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 410: 290-299. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.05.036

POUECH J., MAZIN J.-M., CAVIN L. & POYATO-ARIZA F. J. 2015. — A Berriasian actinopterygian fauna from Cherves-de-Cognac, France: biodiversity and palaeoenvironmental implications. *Cretaceous Research* 55: 32-43. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2015.01.001

REES J., CUNY G., POUECH J. & MAZIN J.-M. 2013. — Non-marine selachians from the basal Cretaceous of Charente, SW France. *Cretaceous Research* 14: 122-131. https://doi.org/10.1016/j.cretres.2013.04.002

RICHMOND D. R., PIGOTT J., LUPIA R., BEHM M. & HEIN D. 2021. — Carbonate mound Springs of the Upper Jurassic Morrison Formation of Central Montana and their Paleoclimatic significance for the Northern Foreland Basin. *Geology of the Intermountain West* 8: 1-26. https://doi.org/10.31711/giw.v8.pp1-26

RIOULT M. 1967. — Sur l'âge albien de *Cycadeoidea micromyela* Morière (Bennettittinée). *Bulletin de la Société linnéenne de Normandie* 7: 9-18.

ROZADA L. 2019. — *Taphonomie de l'assemblage de macrorestes fossiles de vertébrés du Lagerstätte d'Angeac-Charente (Crétacé inférieur, Charente, France)*. Thèse de doctorat, CNRS, MNHN, Sorbonne Université, 285 p. (inédit). https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02786954

SANDERS D., UNDERWURZACHER M. & RÜF B. 2006. — Microbially-induced calcium carbonate in tufas of the western Eastern Alps: a first overview. *Geo Alps* 3: 167-189.

SANDERS D., WERTL W. & ROTT E. 2010. — Spring-associated limestones of the Eastern Alps: overview of facies, deposystems, minerals, and biota. *Facies* 57: 395-416. https://doi.org/10.1007/s10347-010-0252-y

SCHNYDER J. 2003. — *Le passage Jurassique/Crétacé : événements instantanés, variations climatiques enregistrées dans les faciès purbeckiens français (Boulonnais, Charentes) et anglais (Dorset). Comparaison avec le domaine téthysien*. Thèse de l'Université de Lille 1, 400 p. (inédit).

SCHNYDER J., BAUDIN F. & DECONINCK J.-F. 2005. — A possible tsunami deposit around the Jurassic-Cretaceous boundary in the Boulonnais area (northern France). *Sedimentary Geology* 177: 209-227. https://doi.org/10.1016/J.SEDGEO.2005.02.008

SCHNYDER J., DECONINCK J.-F., BAUDIN F., COLOMBIÉ C., JAN DU CHÊNE R., GARDIN S., GALBRUN B. & DE RAFÉLIS M. 2012. — Purbeck beds (Late Jurassic) in the Phare de Chassiron section (île d'Oléron, NW Aquitaine Basin, France): refined age-assignment and long term depositional sequences. *Geobios* 45: 485-499. https://doi.org/10.1016/j.geobios.2012.01.003

SCOTT A. C. & COLLINSON M. E. 2003. — Non-destructive multiple approaches to interpret the preservation of plant fossils: implications for calcium-rich permineralizations. *Journal of the Geological Society of London* 160: 857-862. https://doi.org/10.1144/0016-764902-163

SIMON R. I. 1978. — Minerals found in fossils: a literature survey. *Rock & Minerals* 53: 16-24. https://doi.org/10.1080/00357529.1978.11764737

SIUREK J., CHEVALLIER P., RO C. H., CHUN H. Y., YOUN H. S., ZIEBA E. & KUCZUMOW A. 2004. — Studies on the wood tissue substitution by silica and calcite during the preservation of fossil wood. *Journal of Alloys and Compounds* 362: 107-115. https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00570-X

SPICER R. A. 1991. — *Plant Taphonomic Processes*, *in* ALLISON P. A. & Briggs D. E. G. (eds), *Taphonomy: Releasing the Data Locked in the Fossil Record*. Plenum Press, NewYork: 71-113 (Topics in Geology). https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5034-5_3

SWEENEY I. J., CHIN K., HOWER J. C., BUDD D. A. & WOLFE D. G. 2009. — Fossil wood from the middle Cretaceous Moreno Hill Formation: Unique expressions of wood mineralization and implications for the processes of wood preservation. *International Journal of Coal Geology* 79: 1-17. https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.04.001

UHL D. & LEPPER J. 2006. — Anatomically preserved plant remains from the Lower Triassic of Northern Germany – a contribution to the understanding of permineralization processes. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie* 9: 539-556.

UHL D., JASPER A. & SCHWEIGERT G. 2012. — Charcoal in the Late Jurassic (Kimmeridgian) of Western and Central Europe - palaeoclimatic and palaeoenvironmental significance. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments* 92: 329-341. https://doi.org/10.1007/s12549-012-0072-x

VULLO R., ABIT D., BALLÈVRE M., BILLON-BRUYAT J.-P., BOURGEAIS R., BUFFETAUT E., DAVIERO-GOMEZ V., GARCIA G., GOMEZ B., MAZIN J.-M., MOREL S., NÉRAUDEAU D., POUECH J., RAGE J.-C., SCHNYDER J. & TONG H. 2014. — Palaeontology of the Purbeck-type (Tithonian, Late Jurassic) bonebeds of Chassiron (Oléron Island, western France). *Comptes Rendus Palevol* 13: 421-441. https://doi.org/10.1016/j.crpv.2014.03.003

VULLO R., BUFFETAUT E., NÉRAUDEAU D., LE LOEUFF J., HEIL J.-F. & DUNAND M. 2012. — Le « Mégalosaure » (Dinosauria, Sauropoda) de Saint-Agnant (Charente-Maritime, France) : description et origine stratigraphique. *Annales de Paléontologie* 98: 115-129. https://doi.org/10.1016/j.annpal.2012.02.002

WARD F. L. 1896. — Some analogies in the Lower Cretaceous of Europe and America. *Annual Report of United States Geological Survey* 16: 465-542. https://doi.org/10.3133/ar16_1

WEIDMAN M. 1972. — Le front de la Brèche du Chablais dans le secteur de Saint-Jean-d'Aulph (Haute-Savoie). *Géologie alpine* 48: 229-246.

Soumis le 29 septembre 2021 ;
accepté le 18 janvier 2022 ;
publié le 13 juillet 2022.