

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/255822290>

La Couche à Crassum (Toarcien moyen) au Luxembourg: stratigraphie et faunes de la coupe de Dudelange–Zoufftgen

Article · January 2010

CITATION

1

READS

383

2 authors:



[Dominique Delsate](#)

Musée national d'histoire naturelle de Luxem...

55 PUBLICATIONS 618 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Robert Weis](#)

Musée national d'histoire naturelle de Luxem...

42 PUBLICATIONS 271 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Dinosaur search in the Grand Duchy of Luxembourg [View project](#)



Sedimentology of Triassic and Jurassic formations of Belgian lorraine and Luxemburg [View project](#)

La Couche à Crassum (Toarcien moyen) au Luxembourg: stratigraphie et faunes de la coupe de Dudelange-Zoufftgen

Dominique Delsate

Robert Weis

Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg
25, rue Münster L-2160
Luxembourg
ddelsate@mnhn.lu
rweis@mnhn.lu

Mots clés: Stratigraphie, lithologie, Toarcien moyen, Couche à Crassum, Luxembourg, ammonites, bélemnites, ichthyofaune

Résumé

La position stratigraphique de la Couche à Crassum au Grand-Duché de Luxembourg est discutée à l'aide de la coupe de Dudelange-Zoufftgen qui s'étend des Couches à *Hildoceras bifrons* (zone à Bifrons) aux Couches à *Astarte voltzi* (zones à Variabilis-Thouarsense). D'autres affleurements complémentaires en marge NE du Bassin de Paris sont brièvement décrits à titre comparatif. Il en résulte que la Couche à Crassum correspond à un banc conglomératique dont l'épaisseur varie de 0,1 à 1,5 m, et qui contient des faunes remaniées mixtes des zones à Bifrons-Variabilis. Les changements d'épaisseur et de faciès peuvent être importants même à faible distance latérale. A Dudelange-Zoufftgen, la sédimentation est particulièrement complète et on peut séparer deux horizons, distingués par leur contenu paléontologique et l'attribution biostratigraphique: un horizon avec *Catacoeloceras crassum*, *Hildoceras semipolatum*, *H. bifrons*,

daté de la sous-zone à Bifrons et un horizon avec *Catacoeloceras crassum*, *C. raquinianum*, *Haugia variabilis*, *H. navis*, *Pseudolioceras compactile*, daté des sous-zones à Variabilis et Illustris. Une analyse préliminaire des faunes de céphalopodes (ammonites et bélemnites) et de requins (dents microscopiques) apporte des données nouvelles pour la distribution biostratigraphique et paléogéographique des ces groupes dans le cadre du Bassin de Paris. Les données isotopiques, sédimentologiques et faunistiques indiquent un réchauffement au cours du Toarcien moyen (jonction zones à Bifrons-Variabilis), couplé à une tranche d'eau assez importante. Ces facteurs apparaissent en partie responsables de l'arrivée en abondance de nouvelles faunes, en particulier de raies et de requins, mais aussi de céphalopodes.

Keywords: Stratigraphy, lithology, middle Toarcian, Couche à Crassum, Luxembourg, ammonites, belemnites, ichthyofauna

Abstract

The stratigraphic position of the 'Couche à Crassum' in the Grand-Duchy of Luxembourg is discussed on the basis of the Dudelange-Zoufftgen section, which covers the upper part of the 'Couches à *Hildoceras bifrons*' (Bifrons zone) to the 'Couches à *Astarte voltzi*' (Variabilis-Thouarsense zones). Further outcrops from the NE margin of the Paris basin are briefly described for comparison. The 'Couche à Crassum' is characterised as a conglomeratic bed with a thickness varying from 0,1 to 1,5 m, that contains reworked ammonite faunas of

the Bifrons and Variabilis zones. Changes in thickness and facies are significant even at small distance. At the Dudelange-Zoufftgen section, the sedimentation was particularly complete and two different paleontological horizons can be separated among the 'Couche à Crassum': a inferior one with *Catacoeloceras crassum*, *Hildoceras semipolatum*, *H. bifrons* (Bifrons subzone) and an upper one with *Catacoeloceras crassum*, *C. raquinianum*, *Haugia variabilis*, *H. navis*, *Pseudolioceras compactile* (Variabilis and Illustris subzones). A preliminary

analysis of cephalopod (ammonites and belemnites) and shark (micro teeth) faunas provides new data on the biostratigraphic and paleogeographic distribution of these groups in the framework of the Paris basin. Isotopic, sedimentological and faunistic data indicate a

warming event during the middle Toarcian (boundary Bifrons-Variabilis zones), coupled with a relatively high sea-level. These factors appear to be partially responsible for the arrival of new faunas, particularly sharks and rays, but also cephalopods.

Schlüsselwörter: Stratigraphie, Lithologie, mittleres Toarcium, Crassum-Schicht, Luxemburg, Ammoniten, Belemniten, Ichthyofauna

Zusammenfassung

Die stratigraphische Stellung der "Crassum-Schicht" im Grossherzogtum Luxemburg wird besprochen anhand des Profils Dudelage-Zoufftgen, wo Teile der Schichten mit *Hildoceras bifrons* (Bifrons-Zone) und der Schichten mit *Astarte voltzi* (Variabilis- bis Thouarsense-Zone) aufgeschlossen sind. Weitere Aufschlüsse im nordöstlichen Randbereich des Pariser Beckens werden zum Vergleich kurz besprochen. Die "Crassum-Schicht" entspricht einer konglomeratischen Bank, die in der Mächtigkeit zwischen 0,1 und 1,5 m schwankt, und aufgearbeitete Ammonitenfaunen der Bifrons- und Variabilis-Zonen enthält. Auffallend sind bedeutende Fazies- und Mächtigkeitsschwankungen auf kurze Entfernung. Bei Dudelage-Zoufftgen ist die Sedimentation besonders vollständig, so dass hier zwei paläontologisch getrennte Horizonte unterscheidbar sind: ein unterer Horizont mit *Catacoeloceras crassum*,

Hildoceras semipolatum, *H. bifrons* (Bifrons-Subzone) und ein oberer Horizont mit *Catacoeloceras crassum*, *C. raquinianum*, *Haugia variabilis*, *H. navis*, *Pseudolioceras compactile* (Variabilis- und Illustrius-Subzonen). Eine erste Analyse der Cephalopoden- (Ammoniten, Belemniten) und Haifischfauna (Mikrozähne) erbringt neue Erkenntnisse zur biostratigraphischen und paläogeographischen Verbreitung dieser Gruppen im Rahmen des Pariser Beckens. Die isotopischen, sedimentologischen und faunistischen Daten deuten auf eine Erwärmung und einen relativ hohen Wasserstand während des mittleren Toarciums (Übergang Bifrons-zur Variabilis-Zone) hin. Diese Faktoren erscheinen teilweise verantwortlich für die Auftreten neuer Faunen, insbesondere Haifische und Rochen, aber auch Cephalopoden.

Introduction

Au Grand-Duché de Luxembourg, le Toarcien affleure sur une large bande s'étalant de Rodange jusqu'à Dudelage sur une grande partie du sud-ouest du pays (Fig. 1). Si le faciès des "black shales" du Toarcien inférieur avec leurs remarquables faunes de vertébrés marins, de céphalopodes et d'insectes ont fait l'objet de plusieurs publications dans les dernières décennies (Hanzo 1978, 1979; Delsate, Henrotay & Godefroit 1992; Godefroit 1994; Delsate & Godefroit 1995; Delsate 1997, 1999a, 1999b; Henrotay et al. 1998; Delsate & Maubeuge 2000; Hermoso 2007; Fuchs & Weis 2008), la série marneuse du Toarcien moyen qui succède aux schistes cartons reste jusqu'à ce jour peu étudiée, à l'exception de l'ichthyofaune (Delsate 1990; Delsate & Lepage 1990; Delsate & Candoni 2001). Un chantier ferroviaire ouvert en 2003 sur la ligne Luxembourg-Metz à la hauteur de la route C.R.160 qui mène de Dudelage (L) à Zoufftgen (F) a permis de lever une coupe exceptionnelle au niveau de la Couche à Crassum (Fig. 2). Ce terme désigne un banc conglomératique et

phosphaté au sein des marnes du Toarcien moyen, qui atteint jusqu'à 1,5 m d'épaisseur et constitue un bon niveau de repère. Le terme de Couche à Crassum a été introduit et informellement défini par Lucius (1945). Bien que non-conforme à la nomenclature lithostratigraphique plus récente (voir aussi Hedberg 1976), il nous paraît suffisamment défini et consacré par l'usage afin de l'utiliser par la suite. La Couche à Crassum est à considérer l'équivalent des Marnes de Bacourt en Lorraine, unité introduite par Van Werveke (1901) et formellement définie par Hanzo (1980a, b), bien que peu utilisée par la suite. D'un point de vue paléontologique, la Couche à Crassum est caractérisée par la présence des genres d'ammonites *Catacoeloceras*, *Haugia* et *Denckmannia*. D'un point de vue lithostratigraphique, la Couche à Crassum est intercalée entre les Couches à *Hildoceras bifrons* (lo2 de la carte géologique du Luxembourg) sous-jacentes et les Couches à *Astarte voltzi* (lo3). Dans la plupart des localités luxembourgeoises, elle correspond à un horizon conglomératique de couleur rouille-brun foncé, composé d'une véritable brèche de bélemnites et ammonites fragmentées. Cette couche, variant de plusieurs



Fig. 2: Vue d'ensemble de la coupe de Dudelange-Zoufftgen en été 2003.



Fig. 1: Localisation des sites.

centimètres à plusieurs décimètres, a été observée *in situ* notamment à Soleuvre, à Esch-Belvaux et à Kayl. Située à l'extrémité SE de l'affleurement toarcien au Grand-Duché, la coupe de Dudelange-Zoufftgen révèle par contre une sédimentation plus complète, avec cette couche basale bien développée, à laquelle se superpose un imposant banc marneux de plus d'un mètre d'épaisseur, criblé d'ammonites et de bélemnites de la zone à Variabilis. Ce banc compact est caractéristique de la coupe de Dudelange-Zoufftgen et n'a pas pu être mis en évidence autre part au Grand-Duché ou en Lorraine adjacente. L'ensemble (couche conglomératique et banc marneux) correspond à la Couche à Crassum, qui à Dudelange-Zoufftgen atteint ainsi une épaisseur de 1,50 m.

L'objet de cette contribution est de fournir une description détaillée de cette succession particulière du Toarcien moyen à Dudelange-Zoufftgen. Un aperçu des faunes sera donné pour chaque horizon avec une pertinence particulière pour l'ichthyofaune et les céphalopodes. Finalement on donnera un aperçu sur les autres affleurements de la Couche à Crassum étudiés dans les vingt dernières années par les auteurs et on mettra en relation les nouvelles données paléontologiques fournies par la coupe de Dudelange-Zoufftgen aux données existantes dans la partie nord-est du Bassin de Paris (Lorraine française et belge incluse).

Travaux antérieurs

De nombreux auteurs ont signalé la Couche à Crassum en bordure NE du Bassin de Paris et ponctuellement en ont décrit les faunes d'invertébrés. Ainsi, dans une des premières monographies sur les fossiles jurassiques de Belgique et du Luxembourg, Chapuis & Dewalque (1853) figurent *Ammonites raquinianum*, *A. variabilis* et *A. cornucopia*. Malgré le fait que ces auteurs ne séparent pas un horizon à part au sein des marnes toarciennes, il s'agissait d'un premier indice paléontologique décelant la présence de celui-ci au NE du Bassin de Paris.

Quelques années plus tard, pour la partie nord de la Lorraine, Branco (1879) et Benecke (1898) ont séparé un banc à Crassum au sein des Marnes à Bifrons. Bleicher (1892) décrit des nodules phosphatés dans les marnes noires à *Nodicoeloceras raquinianum*, surtout aux environs de Nancy, entre les Marnes à Bifrons et les Marnes à *Ammonites thoarcensis* et *Astarte voltzii*: abondance de petits nodules irréguliers gris à surface cariée profondément burinée de sillons larges et profonds ou plus étroits, et de traits fins entrecroisés, englobant des fragments d'ammonites dont *Ammonites raquinianus* (débris empâtés dans les nodules), *A. insignis*, *A. bifrons*, *Belemnites tripartitus*. Leur cassure est gris-noirâtre, avec des sections de gastéropodes et bivalves, et des cylindres marnosableux.

Klüpfel (1919) décrit les marnes phosphoritiques de Lorraine, équivalent de la Couche à Crassum, et donne une liste exhaustive de fossiles, dont la

présence des genres d'ammonites *Denckmannia*, *Polyplectus*, *Frechiella*, *Phylloceras* et *Pseudolioceras*.

Corroy & Gérard (1933) séparent une sous-zone à *Coeloceras crassum* dans la partie supérieure de leur zone à *Hildoceras bifrons*, qui dans la région de Metz-Nancy (Lorraine française) correspond à un "niveau de marnes à nodules phosphatées, très fossilifère, contenant surtout *Coeloceras crassum*, *Hildoceras bifrons*, *Harpoceras bicarinatum* et *Mesoteuthis tripartitus*". En outre, les mêmes auteurs signalent la présence des genres *Haugia*, *Phymatoceras*, *Lillia* et *Denckmannia*. Sur ces marnes à nodules phosphatées repose un banc marneux riche en bélemnites (*Acrocoelites* ssp. ainsi que la première apparition de *Dactyloteuthis irregularis*).

Van Werveke (1901, 1910) reporte en Lorraine du Nord un niveau criblé d'ammonites et bélemnites qu'il nomme "Schistes de Bacourt" et qu'il considère l'équivalent des "Jurensis-Schichten" des auteurs allemands. Une faune similaire a été reportée au Luxembourg par Laux (1921). Le niveau en question correspond à la Couche à Crassum qui, sous ce nom, a été officiellement reconnue pour la première fois au Grand-Duché lors des travaux pour la carte géologique par Lucius (1945: 25). Le père de la géologie luxembourgeoise décrit plusieurs affleurements et donne une liste faunistique pour les invertébrés (Lucius 1945, 1948). La coupe de Dudelange-Zoufftgen y est décrite pour la première fois, étant aisément visible suite aux travaux de transformation du tunnel en tranchée ouverte en 1941. Une excursion de la Société des Naturalistes luxembourgeois représente ensuite l'occasion pour une note complémentaire au sujet de cette coupe (Lucius 1956).

Maubeuge (1955, 1958) reprend la coupe levée par Lucius, et subdivise la Couche à Crassum en deux unités phosphatées, dont une supérieure plus riche en bélemnites. Le même auteur cite de nombreuses espèces de céphalopodes et figure un exemplaire de *Lytoceras onychograptum* Buckman, des collections du Musée de Luxembourg.

Dans un important ouvrage de synthèse géologique du Bassin de Paris, Hanzo (1980a; 1980b) redéfinit les Marnes de Bacourt comme reposant sur les Marnes à *Hildoceras bifrons* et sous les Marnes à *Astarte voltzi* en Lorraine.

Plus récemment, Delsate & Lepage (1990) caractérisent pour la première fois la Couche à Crassum en Lorraine belge (Halanzy et Saint-Mard) et y

récoltent de nombreuses micro-dents de requins. Les mêmes auteurs ont également exploité des sites à Mont-Saint-Martin, Longlaville et Ludres-Nancy en Lorraine française ainsi qu'à Belvaux (Luxembourg); ils en tirent les conclusions suivantes quant aux caractéristiques de ce banc:

- richesse en phosphates (sous forme de nodules et moules internes d'invertébrés)
- aspect roulé des fossiles et nodules dans une marne conglomératique
- présence d'ammonites *Catacoleoceras crassum*, *Haugia* ssp., des bélemnites *Dactyloteuthis* ssp. et *Acrocoelites* ssp., bivalves *Astarte* et *Pleuromya*, ainsi que petits moules internes de gastéropodes

Delsate (1990: 22-23) met à jour les connaissances faunistiques suite à l'analyse de neuf gisements situés en France, Belgique et Luxembourg. Le même auteur (Delsate 1992) cite deux nouvelles localités luxembourgeoises où affleurerait temporairement la Couche à Crassum: il s'agit du talus de chemin de fer ARBED à Belvaux et de travaux d'autoroute (Collectrice du Sud), dans le talus entre le tunnel et la route Bascharage-Esch, près de Soleuvre.

Dans une note stratigraphique servant d'explication à la nouvelle carte géologique du Luxembourg (feuille Remich), Dittrich (1993) place le banc à *Coeloceras crassum* dans le Toarcien supérieur, à la base des Couches à *Astarte voltzi* (l03). Quant à l'ichthyofaune, Delsate & Thies (1995) décrivent les dents du requin fossile *Annea* du site de Halanzy (B), tandis que Delsate & Candoni (2001) établissent deux nouveaux morphotypes dentaires de raies du même gisement.

Weis (1999) mentionne deux affleurements temporaires lors des travaux de construction de l'autoroute Collectrice du Sud, à Kayl (avec une puissance de 6 cm) et à Soleuvre, avec une puissance de 30 cm. Le même auteur donne une description des séquences du Toarcien moyen et supérieur à l'ouest de Dudelange et en décrit sommairement les espèces de bélemnites, dont neuf sont recensées pour la seule zone à *Variabilis*. Dera et al. (2008) présentent une note préliminaire sur une étude qui compare les paléotempératures enregistrées dans les dents de requins et dans les rostrs de bélemnites, partiellement en provenance de la coupe de Dudelange-Zoufftgen.

Tout récemment, une étude stratigraphique sur le forage de Belvaux a mis en évidence la présence d'ammonites caractérisant la Couche à Crassum (Guérin-Franiatte, Maquil & Münzberger 2010, ce volume)

Matériel et méthodes

Le matériel étudié a été récolté par les collaborateurs du MnhnL pendant les travaux sur les voies CFL Luxembourg-Metz, sur le site de Dudelange-Zoufftgen en 2003. Plusieurs centaines d'échantillons paléontologiques et lithologiques ont été récoltés et sont conservés dans la collection paléontologique du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg (MnhnL).

Du matériel de comparaison d'autres localités du Sud Luxembourg a été examiné (collection du MnhnL et collections Delsate et Weis, déposées au MnhnL).

Les tests géochimiques (Photométrie: ICP: Inductively coupled plasma mass spectrometry: XRD: Diffractométrie aux Rayons X) ont été réalisés avec la collaboration de Michaël Hermoso, Jean-Luc Piron (Euraceta), Eric Santiquian (Biosemois, Arlon), Paul Vanescote (Gammamedic), TERENCE Delsate (UMH Mons), Alaoui Benzakroum et Hasna Boutzil (Cerphos, Casablanca).

Les ammonites ont été déterminées par Simone Guérin-Franiatte (Nancy). Les fossiles photographiés, sauf dents de requins et raies, ont été blanchis au magnésium. Les ichthyolithes ont été récoltés par tri microscopique de sédiments lavés, tamisés et séchés, puis examinés sous loupe binoculaire.

La subdivision biostratigraphique utilisée est celle proposée par Elmi et al. (1997).

La coupe de Dudelange-Zoufftgen

La coupe de Dudelange-Zoufftgen a été partiellement levée par Lucius (1956) et Maubeuge (1958). Les récents travaux de voirie (2003) l'ont dégagée sur une hauteur totale de 15 mètres pour une tranchée d'une cinquantaine de mètres

environ, ce qui a permis de compléter les observations faites par ces auteurs. La coupe se situe entre les deux ponts enjambant la tranchée du chemin de fer Luxembourg-Metz, à la hauteur de la route C.R.160 qui mène de Dudelange à Zoufftgen. Position du profil levé: 49°28'46" N: 6°06'32" E: alt. 295m.

Profil stratigraphique et inventaire de la faune

La coupe donnait, en 2003, le profil suivant de haut en bas (Fig. 3):

Niveau 12

(échantillonnages I - L1)

< 3 m: marne feuilletée bitumineuse; quelques niveaux ont livré des faunules de vertébrés au tamisage.

Ammonites: *Grammoceras thouarsense* (d'Orbigny, 1844), *Lytoceras sublineatum* (Oppel, 1862)

Gastéropodes: *Cryptaulax* sp.

Biozone: zone à Thouarsense, sous-zones à Thouarsense et Bingmanni

Niveau 11

(échantillonnages II - L2)

0,30 m: marne jaune-grise, avec des résidus d'ichthyosaures, de gastéropodes, crustacés, scaphopodes et ostracodes.

Ammonites: *Grammoceras thouarsense* (d'Orbigny, 1844)

Bélemnites: *Dactyloteuthis* sp., *Acrocoelites* sp.

Ichthyofaune: dents d'actinoptérygiens carnivores; dent de Dapediidae; débris de *Leptolepis*; écailles et centra de Pholidophoriformes, dents de *Synechodus*, *Protospinax*, *Paracestracion*, Orectolobiformes dont "*Heterodontus*" *duffini* (voir Delsate, ce volume), *Orectolobiforme* gen. et sp. nov. (voir Delsate, ce volume), *Annea*, *Ornatoscyllium* et *Palaeobrachaelurus*, *Batomorphii*, Archaeobatidae *Toarcibatis* et *Cristabatis*.

Reptiles: squelette d'ichthyosaure *Stenopterygius* en quasi connexion.

Biozone: zone à Thouarsense, sous-zones à Thouarsense et Bingmanni

Niveau 10

(échantillonnages III - L3 - RR3)

0,30 m: alternance de marnes grises et ocres

Bélemnites: *Dactyloteuthis* sp., *Acrocoelites* sp.

Biozone: zone à Thouarsense, sous-zones à Thouarsense et Bingmanni

Niveau 9

(échantillonnages IV - L4 -RR4)

0,20 m: marnes jaune-grises avec faunule au tamisage: dents de Dapediidae, écailles de Pholidophoriformes, dents de *Protospinax*, coprolithes, spicules, ossicules d'échinodermes, *Lenticulina*.

Ammonites: *Pseudogrammoceras bingmanni* (Denckman, 1887)

Bélemnites: *Dactyloteuthis* ssp.

Biozone: zone à Thouarsense, sous-zones à Thouarsense et Bingmanni

Niveau 8

(échantillonnages V - L5 - RR5 - R3)

0,10 m: marne ocre, très fossilifère, avec bélemnites corrodées. Faunule au tamisage: résidus de poissons, ophiures, gastéropodes, bryozoaires, ostracodes.

Ammonites: *Pseudogrammoceras bingmanni* (Denckman, 1887), *Pseudogrammoceras* sp., *Grammoceras thouarsense* (d'Orbigny, 1844)

Bélemnites: *Dactyloteuthis* ssp.

Ichthyofaune: Actinoptérygiens, carnivores, parasphénoïdes de *Leptolepis*, écailles de Pholidophoriformes, dents de *Protospinax*, Orectolobiformes dont "*Heterodontus*" *duffini* et *Palaeobrachaelurus*, *Paracestracion*, Archaeobatidae *Toarcibatis*.

Biozone: zone à Thouarsense, sous-zones à Thouarsense et Bingmanni

Niveau 7

(échantillonnages VI - L6 -L7 - RR6 - R4)

0,30 m: marne grise (peut être météorisée en marne ocre).

Ammonites: *Pseudogrammoceras* sp., *Denckmannia fabalis* (Simpson, 1855), *Denckmannia* sp., *Lytoceras* sp., *Haugia jugosa* (Sowerby, 1815), *Pseudogrammoceras* sp.

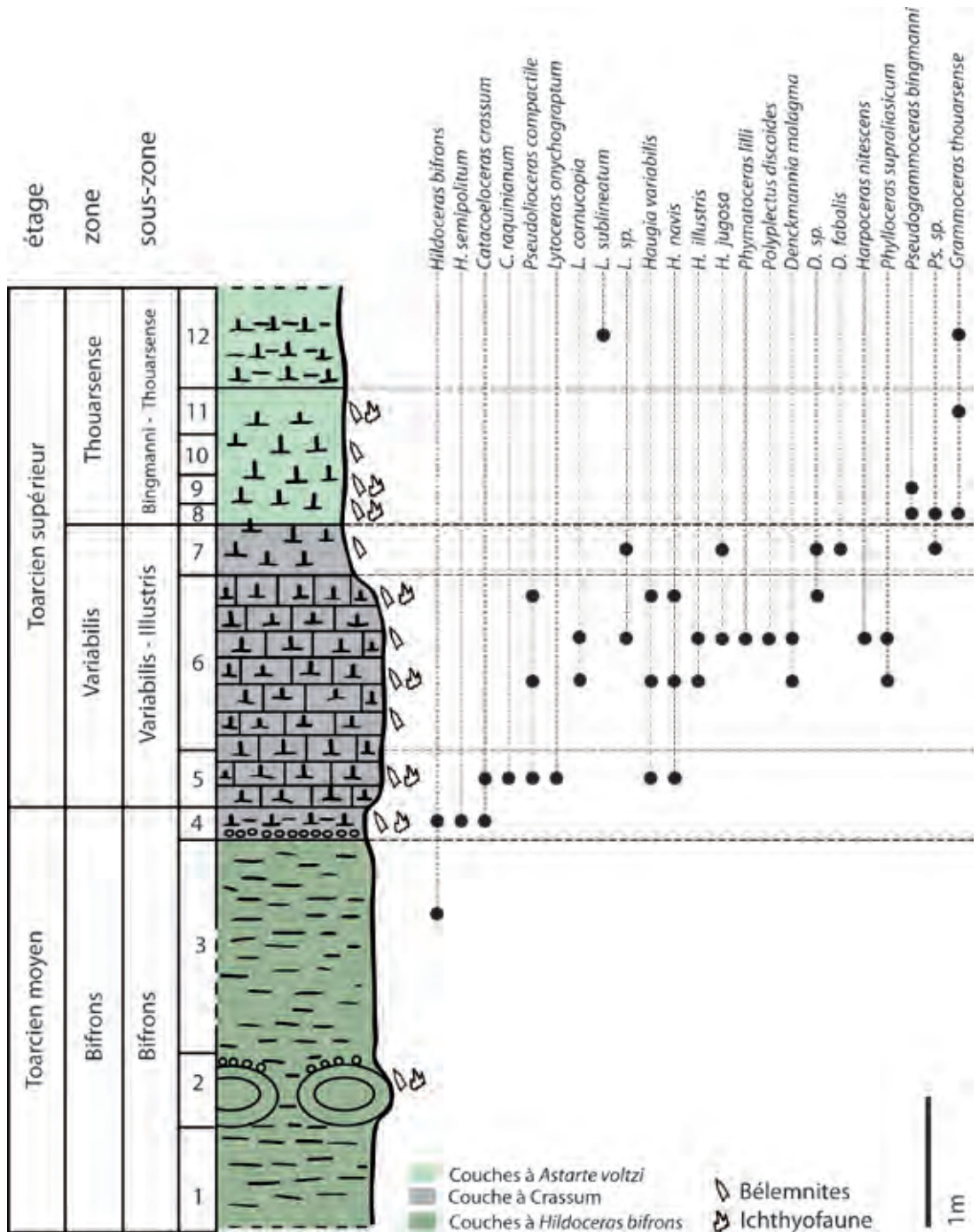


Fig. 3: Profil litho- et biostratigraphique de la coupe de Dudelage-Zoufftgen; répartition des ammonites.

Bélemnites: *Dactyloteuthis semistriata* (Münster, 1830), *D. sp.*, *Acrocoelites* sp.

Bivalves: *Astarte* sp., *Pseudomytiloides* sp., pectinidés

Biozone: zone à Variabilis, sous-zones à Illustris et Variabilis

Niveau 6

(échantillonnages VII - R5 - RR7)

0,95 m: banc marno-calcaire très dur, pétri de céphalopodes et bivalves. Restes de bois fossile carbonisé. Ossements d'ichthyosaures isolés. Avec des nombreuses ammonites *Haugia*, *Denckmannia*, *Phylloceras*, *Lytoceras*, *Pseudolioceras* mais sans *Catacoeloceras crassum*.

Ammonites: *Haugia illustris* (Denckmann, 1887), *Haugia variabilis* (d'Orbigny, 1844), *Haugia jugosa* (Sowerby, 1815), *Haugia navis* (Dumortier, 1874), *Denckmannia malagma* (Dumortier, 1874), *Denckmannia* sp. ind. (nov.?), *Phymatoceras lilli* (Hauer, 1856), *Pseudolioceras compactile* (Simpson, 1855), *Polyplectus discoïdes* (Zieten, 1831), *Harpoceras nitescens* Schlegelmilch, 1976, *Lytoceras cornucopia* (Young & Bird, 1822), *Lytoceras* sp. ind. (nov.?), *Phylloceras supraliasicum* (Pompeckj, 1893)

Nautilites: *Cenoceras* sp.

Bélemnites: *Dactyloteuthis digitalis* (Blainville, 1827), *D. irregularis* (Schlotheim, 1813), *D. semistriata* (Münster, 1830), *Acrocoelites* sp.

Bivalves: *Astarte* sp., *Pseudomytiloides* sp., pectinidés

Ichthyofaune: dents de poissons actinoptérygiens carnivores, angulodentalosplénial de *Leptolepis*, dents de Synéchodontiformes, *Protospinax*, *Paracestracion*, Orectolobiformes dont *Palaeobrachaelurus* et "*Heterodontus*" *duffini*, Archaeobatidae
Biozone: zone à Variabilis, sous-zones à Illustris et Variabilis

Niveau 5

(échantillonnages VIII - R6)

0,30 m: marno-calcaire dur, semblable au niveau 6, silteux, peu de gypse, mais avec *Haugia* et *Catacoeloceras*.

Ammonites: *Catacoeloceras crassum* (Young & Bird, 1828), *Catacoeloceras raquinianum* (d'Orbigny, 1844), *Haugia variabilis* (d'Orbigny, 1844), *Haugia navis* (Dumortier, 1874), *Pseudolioceras compactile* (Simpson, 1855), *Lytoceras onychograptum* (Buckman, 1905)

Bélemnites: *Acrocoelites levidensis* (Simpson, 1855), *A. wrighti* (Oppel, 1856), *A. cf. riegrafi* Doyle, 1992, *A. sp.*, *Dactyloteuthis digitalis* (Blainville, 1827), *D. irregularis* (Schlotheim, 1813), *D. semistriata* (Münster, 1830)

Bivalves: *Astarte* sp., *Pseudomytiloides* sp.

Foraminifères: *Lenticulina*

Ichthyofaune: dents d'Actinoptérygiens carnivores, centra et parasphénoïdes de *Leptolepis*, écailles ganoïdes de type pholidophoriformes, dents de *Synechodus*, *Protospinax*, Orectolobiformes "*Heterodontus*" *duffini*.

Biozone: zone à Variabilis, sous-zones à Illustris et Variabilis

Niveau 4

(échantillonnages VIX - R7)

0,25 m: marnes avec *Catacoeloceras* et *Hildoceras*, bélemnites en champs de bataille avec nodules phosphatés à la base (Pl.1, fig.6), aiguilles de gypse, bois. Au tamisage: microfaune de résidus de poissons, foraminifères, gastéropodes, scaphopodes, coprolithes, galets, gypse, pyrite.

Ammonites: *Hildoceras bifrons* (Bruguière, 1789), *Hildoceras semipolatum* Buckman 1902, *Catacoeloceras crassum* (Young & Bird, 1828)

Bélemnites: *Acrocoelites levidensis* (Simpson, 1855), *A. glaber* (Simpson, 1855), *A. wrighti* (Oppel, 1856), *A. vulgaris* (Young & Bird, 1822), *A. cf. riegrafi* Doyle, 1992, *A. ssp.*, *Simpsonibelus dorsalis* (Phillips, 1867)

Foraminifères: *Lenticulina* et autres

Ichthyofaune: écailles de pholidophoriformes, angulo-dentalosplénial de *Leptolepis*, écailles frangées de Dapediidae, dents d'actinoptérygiens carnivores, droites et courbes: dents de Synéchodontiformes, *Protospinax*, Orectolobiformes dont "*Heterodontus*" *duffini*, *Palaeobrachaelurus* sp, *Jurobatos*
Biozone: zone à Bifrons, sous-zone à Bifrons

Niveau 3

(échantillonnage X)

3 m: argilites pauvres en fossiles: rares *Hildoceras bifrons* (Bruguière, 1789) et *Pseudomytiloides* sp.

Biozone: zone à Bifrons, sous-zone à Bifrons

Niveau 2

(échantillonnage XI)

0,5 m: à 4 m de la base du niveau 4, présence d'un banc inconstant de nodules calcaires pluri-

décimétriques (Big Mac), couverts par des galets-nodules phosphatés centimétriques et des bélemnites souvent brisées. A ce niveau, faunule au tamisage: parasphénoïdes de *Leptolepis*, écailles de pholidophoriformes, gypse, coprolithes, gastéropodes millimétriques, crochets de bélemnites.

Bélemnites: *Acrocoelites levidensis* (Simpson, 1855), *Acrocoelites* ssp.

Biozone: zone à Bifrons, sous-zone à Bifrons

Niveau 1

(échantillonnage XII)

>3 m: argilites, identiques au niveau 3.

Biozone: zone à Bifrons, sous-zone à Bifrons

Particularités sédimentologiques

Les Couches à *Hildoceras bifrons* (fig. 3: 1-4) consistent en argilites gris noir bitumineuses. Une ligne de nodules phosphatés centimétriques est constante vers le sommet de ces couches (fig. 3: 2), coiffant des septaria (Pl.1, fig.7) métriques de type "Big Mac" (voir De Craen et al. 1999a, b; Jacobs, Olivier & Swennen 2005). Un banc calcaire métrique impressionnant et inhabituel dans cette région (fig. 3: 4-5) représente le sommet de la zone à Bifrons (fig. 3: 4), marqué également par la présence disséminée de dragées phosphatées du même type que celles coiffant les septaria métriques, et la base de la zone à Variabilis (fig. 3: 5), ces 2 niveaux formant la Couche à Crassum (Pl.1, fig. 5). Le banc calcaire est surmonté par les argiles jaune-beige des Couches à *Astarte voltzi* (fig. 3: 6 à 12, suite de la zone à Variabilis et zone à Thouarsense).

Rapports chimiques entre argilites et nodules phosphatés de la Couche à Crassum

Des dragées (ou galets, ou "nodules") phosphatées sont abondantes dans la Couche à Crassum (comme dans tout le NE du Bassin parisien) mais aussi - comme particularité locale - en zone à Bifrons, quelques mètres sous le même niveau

de la Couche à Crassum, en une ligne coiffant des nodules septariés métriques (Big Mac). Ces dragées en Lorraine belgo-luxembourgeoise et en zone de Longwy/Mont-Saint-Martin ne contiennent jamais de fossile. Les moules internes des fossiles de la Couche à Crassum sont également phosphatés. En zone de Nancy-Ludres-Agincourt, les phosphates sont concentrés dans des calcaires gris-beige, incluant des macrofossiles et des ostracodes, et dans les moules internes des fossiles (Bleicher 1892: Delsate, observations personnelles). La teneur en phosphate de chaux d'un échantillon de Malzéville (Meurthe et Moselle) est de 13,5% (Bleicher 1892). A remarquer donc que dans la Couche à Crassum de Lorraine belgo-luxembourgeoise, les "nodules" de calcaire en pâte phosphatée englobant *C. crassum*, bélemnites, etc., décrits par Bleicher en région de Nancy (et retrouvés à Agincourt, Ludres) font défaut; s'il y a en Lorraine belgo-luxembourgeoise des blocs lithifiés englobant des fossiles, ils sont plus calcaires et moins "phosphatés" que ceux d'Agincourt ou Ludres (figurés par Bleicher). Il semblerait donc que blocs phosphatés fossilifères et dragées phosphatées azoïques s'excluent mutuellement, probablement par un processus de phosphatisation différent. Notons qu'à Agincourt/Essey-les-Nancy, la marne et les blocs phosphatés fossilifères de la Couche à Crassum contiennent d'innombrables pellets phosphatés inframillimétriques, moules internes de foraminifères et d'ostracodes, retrouvés d'ailleurs dans la zone à Variabilis de la carrière de Lixhausen en Alsace (Delsate, observations personnelles).

Notons que Lucius (1945) donnait la composition des dragées phosphatées et des moules internes de fossiles de Zoufftgen (Tabl. 1):

Les nodules contiennent 50 % de silice en plus, 30 % de calcium et de fer en plus, alors que les moules internes sont à 80 % plus riches en oxyde d'aluminium, peu surprenant vu leur nature argileuse. Mais ce test n'explore pas le rapport entre argiles - argilites encaissantes et dragées phosphatées. Nous avons donc testé les rapports entre dragées phosphatées et argile encaissante: le traitement acide concentré (HCl + HNO₃) libère bien les Ca et PO₄ des sédiments. La détermination des ions s'effectue par ICP. Les nodules montrent par rapport à l'argilite un enrichissement nettement préférentiel en phosphate de calcium: 10 à 20 fois en P total (peut-être au détriment des

Tabl. 1: Résultats des analyses d'échantillons de Dudelange-Zoufftgen (d'après Lucius 1945).

	MOULES INTERNES	NODULES PHOSPHATÉS
SiO ₂	9.20 %	14.10 %
Al ₂ O ₃	28.42 %	16.38 %
CaO	19.36 %	26 %
Fe	2.87 %	3.92 %
P ₂ O ₅	29.98 %	23.92 %

bicarbonates) et 3 à 6 fois en Ca, avec des valeurs quasi stables en SO₄ et en Fe, et une réduction de 2 à 3 fois en Mg.

Cela est compatible avec l'hypothèse de "phosphate fabric" de francolite, à l'œuvre au sein des sédiments en zone suboxique sous la limite eau de mer / sédiments (Trappe 1998). La confirmation de la francolite n'est néanmoins pas obtenue par des essais en XRD.

Diagrammes XRD sur poudre

(avec la collaboration de Michaël Hermoso)

Appareil et méthode: SIEMENS D-501/ Anode en cuivre (Cu α) / Balayage goniométrique: 3 à 72° 2 θ ; pas: 0,02° 2 θ ; temps de comptage par pas: 1 seconde.

ZFTG Nodules phosphatés de la base de la Couche à Crassum

Le broyage est difficile et livre une poudre gris sombre. Il n'y a pas de Carbonate: Quartz et Pyrite sont accessoires: ces nodules sont de nature phosphatée. Minéralogiquement, les trois pics entre 32 et 35° sont caractéristiques d'une Fluorapatite.

ZFTG Marne encaissante, base de la Couche à Crassum

Quartz et Argile (Kaolinite + Muscovite) sont très abondants. Le pic de Calcite (104) est complexe, Il n'y a pas de Dolomite; il est épaulé vers les grands angles par un pic de Gypse (041): la quantité de Gypse est très importante, alors que celle de la Pyrite dont le Gypse provient y est faible.

ZFTG Septaria des Couches à *Hildoceras bifrons*, pour comparaison à l'encaissant de la Couche à Crassum et aux nodules phosphatés.

Nodule largement dominé par le Quartz mais la Calcite est quand même abondante (Mgmol% = 1.61); présence de Gypse et Pyrite; le cortège argileux est identique à celui des marnes de la coupe: kaolinite, muscovite et chlorite.

ZFTG Marne du niveau 9 (zone à Thouarsense)

Présence de carbonates réparties en 30% calcite (Mgmol% = 0,84) et 70% dolomite. La dolomite doit être relativement précoce, car elle s'exprime par de gros monocristaux (20 Microns) rhomboédriques (Hermoso et al. 2009a, 2009b). On retrouve aussi Quartz, Argiles, Gypse et Pyrite.

Mécanisme supposé de l'enrichissement en phosphate

La décomposition bactérienne des tissus organiques libère de l'acide phosphorique et de l'ammoniaque, qui réagissent en formant du phosphate d'ammonium. Celui-ci en contact avec le calcaire forme du phosphate de chaux et du carbonate d'ammonium qui réagit avec le calcaire pour donner du nitrate de chaux. Le phosphate bibasique de chaux est soluble et précipite sous forme de brushite, précurseur de l'hydroxyapatite, plus stable (voir Lucas & Prevost 1995: Trappe 1998).

Comparaison entre Dudelange-Zoufftgen et Halanzy (B)

L'argile de Halanzy, par rapport à l'argilite de Dudelange-Zoufftgen est quasi 2 fois plus riche en Fe, Mg, K; 4 fois plus riche en Si; 15 fois plus riche en Na; 2 fois plus pauvre en Ca.

Les nodules de Halanzy et Dudelange-Zoufftgen ont des compositions semblables en Ca, Fe, Mg, K, Si, P total, sauf le Na quasi double et le SO₄ quasi

moitié à Halanzy. Parmi les autres composants, on retient:

- la teneur en eau: elle atteint 4% dans l'argile de Halanzy, préalablement séchée.
- la teneur en matière organique: elle atteint 0.2 % dans l'argile de Halanzy, contre 6 fois moins dans ses nodules. Elle comporte des hydrocarbures (extraits par chloroforme et révélés par UV) dans l'argile, mais absents dans les nodules.

Affleurements régionaux de la Couche à Crassum

Lucius (1945) signale plusieurs affleurements de la Couche à Crassum au Luxembourg. Depuis, les sites suivants, équivalents à des chantiers temporaires, ont été décrits ou prospectés: tous présentent un faciès différent de celui constaté à Dudelange-Zoufftgen.

Longlaville (F), Pôle Européen de Développement (Pl.1, fig.3)

Position: 49°32'37.82"N: 5°48'19.67"E: alt 268m
Rue Jacques Prévert, talus de la route entre 2 ronds points sur le Pôle européen de Développement, face au site Auchan-Mont-Saint-Martin, en contre-haut et perpendiculairement à la voie ferrée. L'affleurement livre *Catacoeloceras crassum* et *Hildoceras* sp.; les dragées phosphatées sont plus aplaties, plus argileuses et moins pyriteuses (plus limonitiques) que celles de Dudelange-Zoufftgen ou de Halanzy

Halanzy (B), prairie en bordure Est de la Rue des Vergers

Position: 49°38'23" N: 5°45'10" E: alt. 300m
L'affleurement, décrit par Delsate & Lepage (1990) a livré *Catacoeloceras crassum* et *Hildoceras* sp. Le banc est accessible dans les talus en bordure des champs. Il correspond à une argile brun clair (Pl.1, fig.4), avec dragées phosphatées, quasi sans pyrite, riche en cristaux de gypse, "lumachellique" vu l'abondance des rostres de bélemnites, des coquilles d'*Astarte*, des ammonites. Il tranche entre les Couches à *Hildoceras bifrons* et les Couches à *Astarte voltzi*, bleu-gris très pyriteuses.

Soleuvre (L), talus de l'autoroute 'Collectrice du Sud' au niveau de la route Bascharage-Esch (1990-1992)

Position: 49°31'50" N: 5°56'38" E: alt. 333m
Le banc (Pl. 1, fig.2), d'une puissance de 30 cm, se présente ici sous forme d'un conglomérat rouge-brun oxydé, riche en fossiles roulés, dont des moules internes d'ammonites et de bivalves, et de nombreux fragments de bélemnites. *Hildoceras* et *Catacoeloceras* (Pl. 2, figs. 1,3) sont prédominants. Des déterminations (Guérin-Franiatte, comm. pers.) d'ammonites provenant du site (collection MnhnL) ont livré les données suivantes: *Hildoceras semipolium* Buckman 1902, *Pseudolioceras compactile* (Simpson, 1855), *Denckmannia malagma* (Dumortier, 1874), *Lytoceras onychograptum* (Buckman, 1904), *Catacoeloceras crassum* (Young & Bird, 1828).

En outre ont été trouvés des nautilus (*Cenoceras* sp.), des fragments de bélemnites (*Acrocoelites* ssp.), des bivalves (*Astarte* sp., *Ideonarca* sp.) et des moules internes de gastéropodes indéterminés. Pour des compléments faunistiques, voir aussi Delsate (1992).

Belvaux (L), talus du chemin de fer ARBED-ARCELOR (1990-1992)

Position: 49°30'35.33" N: 5°55'48.34" E: alt 322 m
Le banc, identique à celle de Soleuvre, se présente sous forme d'un conglomérat rouge-brun oxydé (Pl.1, fig.1), qui contient des fossiles roulés, dont des moules internes d'ammonites et de bivalves, et de nombreux fragments de bélemnites (*Acrocoelites*). *Hildoceras semipolium* et *Catacoeloceras crassum* sont prédominants. Puissance: 30 cm. Le site a été prospecté par Delsate (1992). Parmi les ammonites dans la collection du MnhnL ont été déterminés (Guérin-Franiatte, communication personnelle): *Catacoeloceras crassum* (Young & Bird, 1828), *Catacoeloceras dumortieri* (De Brun, 1932), *Catacoeloceras confectum* Buckman, 1902, *Catacoeloceras raquinianum* (d'Orbigny, 1844), *Hildoceras semipolium* Buckman, 1902.

Kayl-Noertzange (L), tranchée de l'autoroute 'Collectrice du Sud' (1992)

Position: 49°30'21" N: 6°02'22" E: alt. 292m
D'aspect et de contenu identique au banc que l'on retrouve à Soleuvre et Belvaux, la Couche à Crassum est néanmoins moins puissante (Weis 1999). Parmi les fossiles: des débris roulés de



bélemnites et ammonites, ainsi que des bivalves (*Pleuromya*, *Astarte*).

Dudelange-Budersberg (L), travaux de terrassements pour la construction d'une grange (1996-1997)

Position: 49°29'42" N: 6°03'51" E: alt. 303m

L'affleurement se situe dans des marnes jaunâtres avec intercalations de plaques calcaires dures. Les fossiles se trouvent dans les marnes, mais le plus souvent compactés à la surface de ces plaques calcaires (Weis 1999). Ces marnes sont l'équivalent des niveaux 5-7 de la coupe de Dudelange-Zoufftgen et correspondent donc à la zone à Variabilis.

Le matériel de la collection du MnhnL a livré (Guérin-Franiatte, communication personnelle): *Catacoeloceras raquinianum* (d'Orbigny, 1844), *Haugia variabilis* (d'Orbigny, 1844), *Haugia navis* (Dumortier, 1874), *Grammoceras bingmanni* (Denckmann, 1887).

Lamorteau (B), colline au Nord du village, prairie en bord sud de la route (Rue des Morts), berges du ruisseau.

Position: 49°31'52" N: 5°28'08" E: alt. 243m

L'affleurement, exploré par D. Delsate et J. Stasser dans les années 1990, a livré *Catacoeloceras crassum*, *Hildoceras* sp. La couche est accessible dans le ruisseau en bordure de la route. Elle correspond à une argile brun clair (livrant *Dactyloteuthis*, des coquilles d'*Astarte*, de bivalves et de gastéropodes, et une microfaune de requins), enrobant des blocs calcaires pluridécimétriques très durs, qui contiennent, outre les ammonites citées, *Lytoceras*, *Cenoceras* et *Dactyloteuthis*.

Discussion

Position biostratigraphique de la Couche à Crassum au Grand-Duché: le cas spécial de la coupe de Dudelange-Zoufftgen

La Couche à Crassum correspond à un banc-repère au moins partiellement conglomératique et condensé, son attribution biostratigraphique n'est pas uniforme pour toute la bordure NE du Bassin de Paris. Ainsi, sur la majeure partie du territoire luxembourgeois, cette couche contient des faunes condensées, en partie remaniées, de la zone à Bifrons, sous-zone à Bifrons (surtout *Catacoeloceras crassum* et *Hildoceras semipolatum*), et de la zone à Variabilis, sous-zone à Variabilis (*Denckmannia malagma* et *Pseudolioceras compactile* à Sanem). C'est donc à juste titre que Dittrich (1993) la place à la base de la zone à Variabilis. La situation stratigraphique doit cependant être nuancée pour la région de Dudelange-Zoufftgen, où la Couche à Crassum est mieux développée: ici une attribution biostratigraphique plus affinée est possible. Le niveau 4 (avec *Catacoeloceras crassum*, *Hildoceras semipolatum* et *H. bifrons*) correspond à l'horizon à Semipolatum de la sous-zone à Bifrons et le niveau 5 (avec *Catacoeloceras crassum*, *C. raquinianum*, *Haugia navis* et *Pseudolioceras compactile*) correspond à l'horizon à Navis de la sous-zone à Variabilis.

La faune de bélemnites

La riche faune de bélemnites de Dudelange-Zoufftgen, récoltée niveau par niveau ensemble avec les ammonites, fait actuellement partie d'une révision et sera donc publiée en détail ultérieurement (Weis et al., travail en cours). On se limitera à énoncer ici les principales particularités de la composition faunistique (Pl. 5, figs. 1-4) des différents horizons de la Couche à Crassum. Ainsi il est frappant de noter un net changement des

Planche 1: Affleurements et particularités sédimentologiques du Toarcien moyen au Luxembourg et environs.

Fig. 1: Détail de la Couche à Crassum à Belvaux (L) avec ammonites et bélemnites.

Fig. 2: Affleurement de la Couche à Crassum à Soleuvre (L). Photo G. Kronz.

Fig. 3: Affleurement de la Couche à Crassum à Longlaville (F).

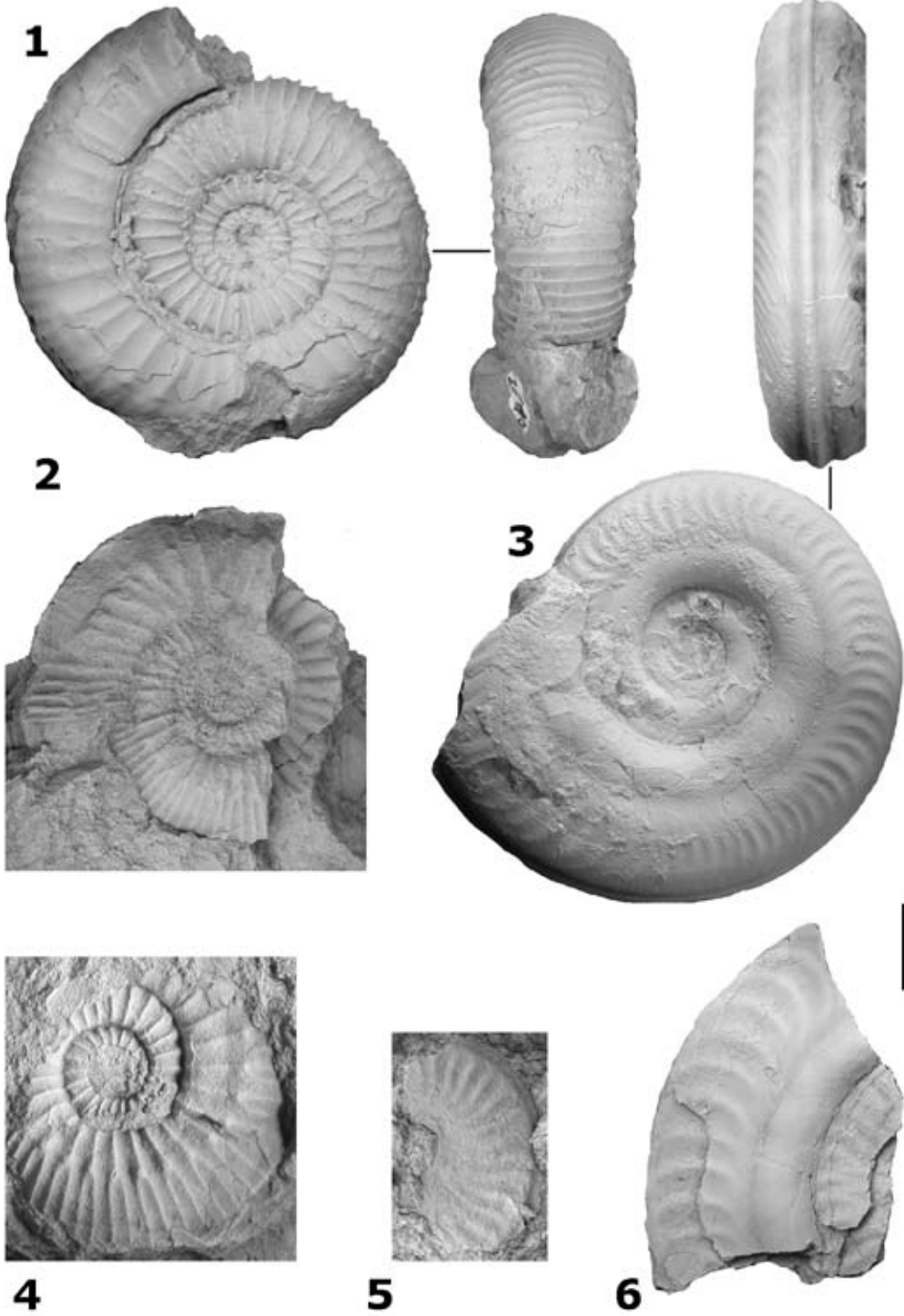
Fig. 4: Affleurement de la Couche à Crassum à Halanzy (B).

Fig. 5: La Couche à Crassum (niveaux 4-7) à Dudelange-Zoufftgen. Photo K. Meiers.

Fig. 6: Détail de la Couche à Crassum à Dudelange-Zoufftgen avec ammonites et bélemnites. Photo K. Meiers.

Fig. 7: Nodule "Big Mac" dans les Couches à *Hildoceras bifrons*, à Dudelange-Zoufftgen.

Barre blanche: 10 cm



faunes entre l'horizon inférieur (4) et l'horizon supérieur (5): le premier, caractérisée par les ammonites *Catacoeloceras crassum* et *Hildoceras semipolatum*, contient une faune de bélemnites très riche composée de plusieurs espèces de *Acrocoelites* (*A. levidensis*, *A. wrighti*, *A. glaber*, *A. vulgaris*, *A. ssp.*). Cette faune a une forte affinité avec les faunes anglaises (Doyle 1990, 1992), caractérisées par la prédominance du genre *Acrocoelites* pour le passage Toarcien moyen-Toarcien supérieur, et la quasi absence de *Dactyloteuthis*. L'horizon supérieur par contre, renferme un grand nombre de *Dactyloteuthis* (*D. digitalis*, *D. irregularis*, *D. semistriata*) et de rares *Salpingoteuthis*, espèces à affinité subméditerranéenne (Stoyanova-Vergilova 1982; Doyle 1987) tandis que *Acrocoelites* devient nettement moins important au niveau spécifique et en nombre de spécimens (sont néanmoins présents *Acrocoelites triscissus*, *A. ssp.*). Au niveau des bélemnites, on peut donc énoncer l'hypothèse de flux migratoires venant du Bassin anglais (Dorset) pour la zone à Bifrons finale et d'une migration de faunes à affinité subméditerranéenne pour le début de la zone à Variabilis.

L'ichthyofaune dans le contexte du Bassin de Paris

En dessous de la Couche à Crassum, les requins toarciens sont peu diversifiés, on connaît de rares *Hybodus hauffianus* et des Synéchodontiformes (*Synechodus* sp. et *Welcommia*) des Schistes carton et des Couches à *Hildoceras bifrons* (Delsate 1992, 1995; Delsate & Godefroit 1995; Delsate & Maubeuge 2000). La coupe de Dudelage-Zoufftgen livre des dents de poissons actinoptérygiens et de chondrichthyens à partir du niveau 4 soit la base de la Couche à Crassum. Le niveau le plus productif est le 11 (en zone à Thouarsense), c'est lui qui a livré également l'ichthyosaure. L'ichthyofaune de Dudelage-Zoufftgen (Pl. 6, figs. 1-11), incluant des morphotypes dentaires nouveaux, sera publiée en détail par Delsate (travail en cours): des groupes anciens (Hybodontiformes,

Synéchodontiformes) auxquels viennent s'ajouter des Hypnosqualea, Hétérodontiformes, Batomorphes, Squatiniformes et Orectolobiformes (soit les composants de la faune actuelle sans les Squaliformes, Carcharhiniformes, Lamniformes et Pristiophoriformes).

L'ichthyofaune limitée au niveau de la Couche à Crassum à Esch-Belvaux, Halanzy, Longwy, Mont-Saint-Martin (Delsate 1990), est bien représentée à Dudelage-Zoufftgen au sommet de la zone à Bifrons, incluant la partie inférieure de la Couche à Crassum, mais aussi dans la totalité des zones à Variabilis et à Thouarsense, ici probablement à cause de conditions d'oxygénation différentes à Dudelage-Zoufftgen, où l'intervalle Variabilis-Thouarsense montre des calcaires et des marnes jaunes au lieu de sédiments pyriteux ou limonitiques dans les autres sites du NE du Bassin de Paris.

Les marnes lumachelliques de la sous-zone à Mactra, zone à Aalensis (Toarcien supérieur) de Dudelage-Ginzeberg (Delsate 2004) montrent à merveille les successeurs des requins et raies de la coupe de Dudelage-Zoufftgen, visiblement en environnement différent, avec une faune principalement de broyeurs, où les dents d'orectolobiformes sont quantitativement minoritaires et où les hybodontiformes (*Lissodus*, *Asteracanthus*) réapparaissent.

En comparant les sites luxembourgeois à d'autres sites récemment explorés par D. Delsate dans différentes parties du Bassin de Paris (Lixhausen en Alsace, Feuguerolles-sur-Orne en Normandie), on obtient les données suivantes:

- En Alsace, le Toarcien de Lixhausen, argilo-pyriteux, présente un ensemble faunique du type "Couche à Crassum" dès la zone à Variabilis, sans pouvoir reconnaître un niveau équivalent à la Couche à Crassum.

Planche 2: Ammonites du Toarcien de Dudelage-Zoufftgen (sauf indication contraire).

Fig. 1: *Catacoeloceras crassum* (Young & Bird, 1828). Couche à Crassum, Soleuvre (L). MnhnL TM153.

Fig. 2: *Catacoeloceras raquinianum* (d'Orbigny, 1844). Niveau 5, zone à Variabilis. MnhnL TM174.

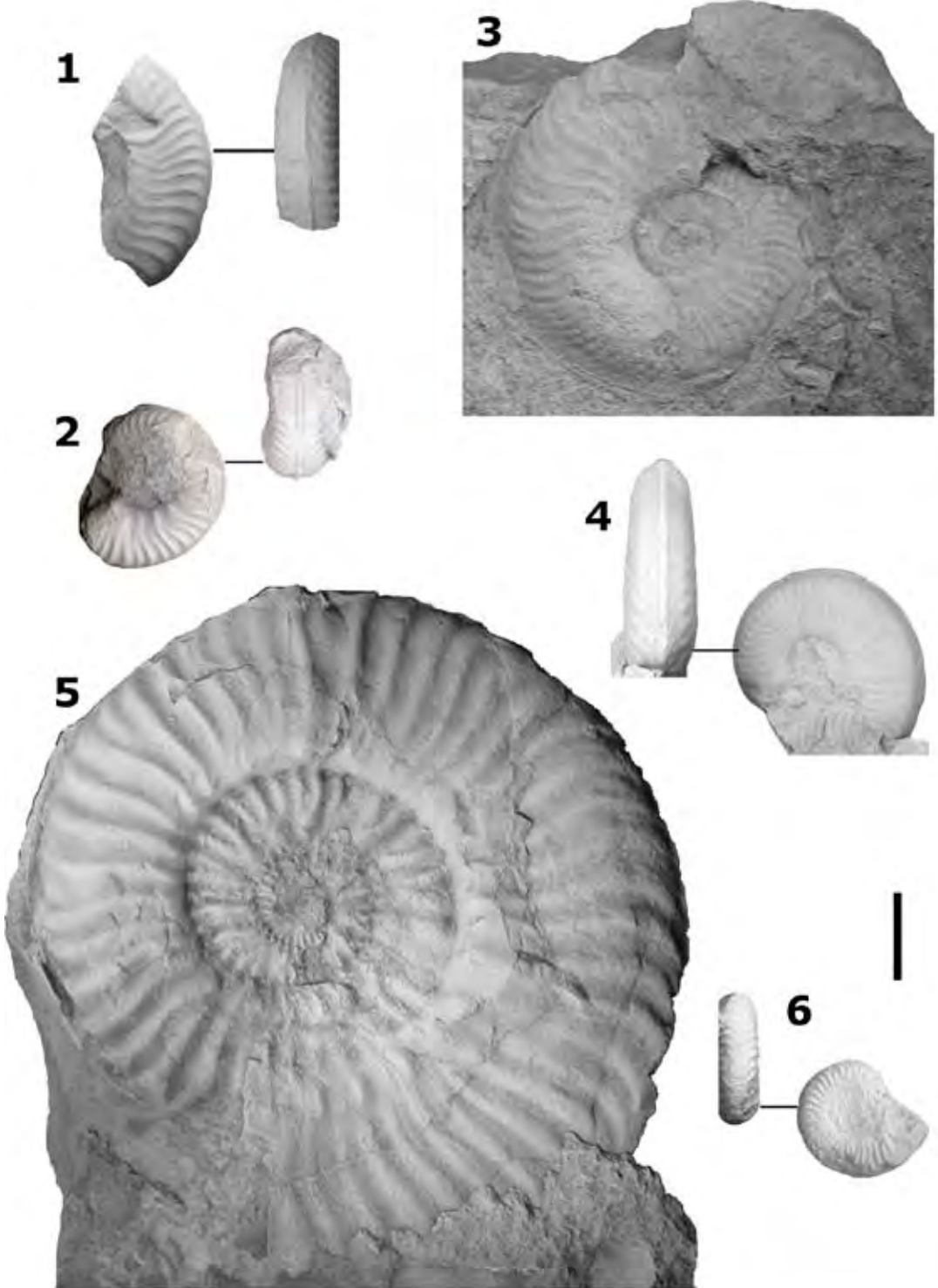
Fig. 3: *Hildoceras semipolatum* Buckman 1902. Couche à Crassum, Soleuvre (L). MnhnL TM154.

Fig. 4: *Catacoeloceras crassum* (Young & Bird, 1828). Niveau 5, zone à Variabilis. MnhnL TM169.

Fig. 5: *Pseudolioceras compactile* (Simpson, 1855). Niveau 5, zone à Variabilis. MnhnL TM171.

Fig. 6: *Hildoceras bifrons* (Bruguière, 1789). Niveau 3, zone à Bifrons. MnhnL TM161.

Barre: 1 cm



- En Normandie (Feuguerolles-sur-Orne, Calvados), le même type de faune, avec Batomorphii Archaeobatidae, *Paracestracion* et *Protospinax*, est déjà bien installé dès le Toarcien basal (zone à Tenuicostatium) encore sans les Orectolobiformes: la lithologie y est argilo-calcaire, avec très peu de passées pyriteuses.
- En Lorraine, la sédimentation des zones à Serpentinum et Bifrons s'effectue en milieu anoxique (faciès des schistes-cartons et des marnes bitumineuses) avec fond anoxique qui n'a pas permis l'existence des Archaeobatidae et autres néosélaciens: ceux-ci n'apparaissent en Lorraine qu'au sommet de la zone à Bifrons, quand le benthos est à nouveau oxygéné. Pendant la période de fond anoxique en Lorraine, les néosélaciens modernes du type "Couche à Crassum" (au-delà des Synéchodontiformes et Hexanchiformes, bien installés déjà au Pliensbachien) se développent en Normandie, demeurée en milieu oxygéné (faciès carbonaté d'alternances marno-calcaires): raies Archaeobatidae (présents dès la zone à Tenuicostatium), *Protospinax* (dès la zone à Tenuicostatium), *Paracestracion* (dès la zone à Serpentinum), Orectolobiformes: *Annea* (dès la zone à Serpentinum), *Palaeobrachaelurus* (présent dès la zone à Serpentinum), "*Heterodontus*" *duffini* (dès la zone à Bifrons).

La faune en zone à Tenuicostatium de Normandie est voisine de celle de Lorraine (Delsate & Godefroit 1995), avec d'abondants Synéchodontiformes (cuspidés avec très rares racines); la Lorraine livre en plus *Welcommia terencei*, que l'on retrouve de la zone à Serpentinum à la zone à Thouarsense à Feuguerolles (Normandie).

Parmi les Hybodontiformes, *Lonchidion* est bien présent dans les zones de Tenuicostatium à Thouarsense. *Asteracanthus* est présent dans la sous-zone à Mactra, zone à Aalensis de Lorraine, et retrouvé dans l'Aalénien tant de Lorraine que du Calvados.

Les Synéchodontiformes (*Synechodus* sp., *Paraorthacodus* sp.) sont présents au Pliensbachien et persistent pendant tout le Toarcien, tant en Lorraine qu'en Normandie.

Sphenodus est le genre le plus fréquent dans tout le Toarcien du Calvados: en Lorraine, sa présence est rare, il ne devient très abondant qu'au Bajocien (Delsate & Felten 2005).

Les Archaeobatidae sont très précoces en Normandie, et abondantes principalement en zones à Serpentinum-Bifrons, puis deviennent beaucoup moins abondantes (alors qu'elles sont fréquentes au-delà de ces zones en Lorraine et dans le Nivernais). *Toarcibatis* apparaît dès la zone à Tenuicostatium, avec les espèces *brevicristata* et *multicristata*. La localité-type de *Toarcibatis multicristata* est Chassilé, La Vègre, près du Mans, celle de *Toarcibatis brevicristata* est Chaumitton près de Mamers. L'espèce *Toarcibatis elongata* (définie de la Couche à Crassum de Halanzy) semble présente en zone à Bifrons de Feuguerolles: *Toarcibatis alticarinata*, décrite du Toarcien supérieur (zones à Thouarsense-Pseudoradiosa) de Nevers est représentée à Feuguerolles dans la zone à Bifrons par des couronnes à cuspidé en cimier de casque, typique de l'espèce.

Protospinax, *Paracestracion* et les Orectolobiformes sont minoritaires en Normandie, mais abondants en Lorraine.

Dominants en Lorraine à partir de leur apparition au niveau de la Couche à Crassum, les Orectolobiformes sont peu abondants dans tout le Toarcien du Calvados: l'Orectolobiforme probable *Microtoxodus*, décrit en Lorraine dans la sous-zone à Mactra, zone à Aalensis est déjà présent en Normandie en zone à Thouarsense et peut-être Variabilis. Le taxon est donc confirmé et conforme à sa définition (Delsate 2004), proche mais différent (morphologie de l'apron) de son cousin aalénien *Folipistrix digitulus*, du Sud de l'Allemagne (Kriwet

Planche 3: Ammonites du Toarcien de Dudelage-Zoufftgen.

Fig. 1: *Grammoceras thouarsense* (d'Orbigny, 1844). Niveau 8, zone à Thouarsense. MnhnL TM203.

Fig. 2: *Haugia navis* (Dumortier, 1874). Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM186.

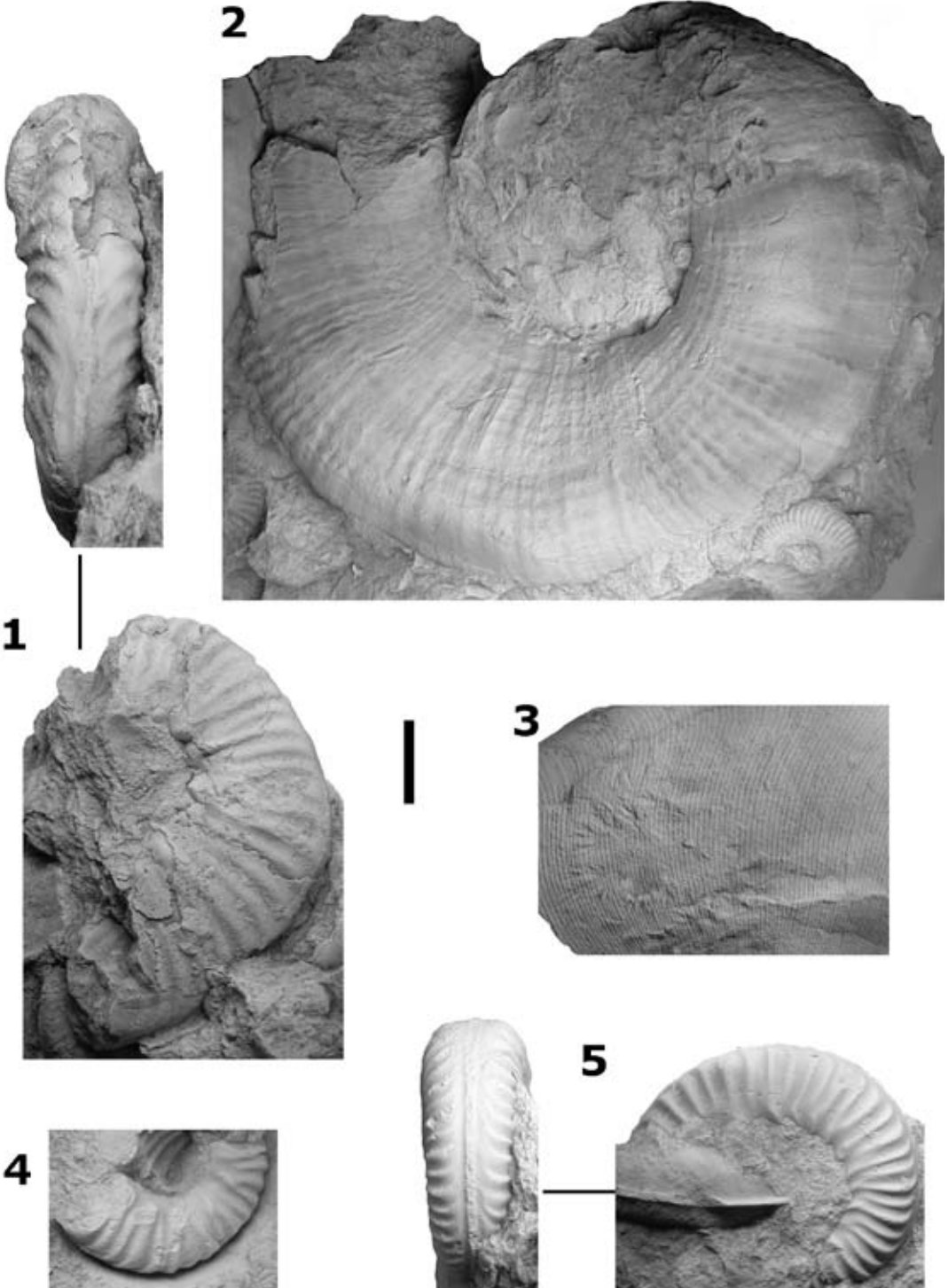
Fig. 3: *Har poceras nitescens* Schlegelmilch, 1976. Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM178.

Fig. 4: *Haugia illustris* (Denckmann, 1887). Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM188.

Fig. 5: *Denckmannia malagma* (Dumortier, 1874). Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM184.

Fig. 6: *Pseudogrammoceras bingmanni* (Denckman, 1887). Niveau 8, zone à Thouarsense. MnhnL TM201.

Barre: 1 cm



2003). *Annea*, présent dans les Marnes de Bacourt de Lorraine, existe dès la zone à Serpentinum à Feuguerolles. Des *Palaeobrachaelurus* sont présents dès la zone à Bifrons de Normandie.

Le tableau 2 permet d'approcher les contraintes environnementales à l'origine de la distribution des taxons. Les variations de température de l'eau de mer, estimées par mesures isotopiques (delta 18O sur émailloïde de néosélaciens) du Domérien au Toarcien de Lorraine, semblent montrer que le réchauffement a pu favoriser les processus de spéciation au début du Toarcien (en Lorraine pour les actinoptérygiens seuls), spéciation bien marquée aussi en Normandie par la diversité des espèces de néosélaciens, avec un ressaut thermique pour le Toarcien moyen, surtout marqué en Lorraine par la disparition des faciès anoxiques. Après un réchauffement extrême à la base de la zone à Falciferum (induisant donc une explosion de diversité des poissons actinoptérygiens, sans grosse variation parmi les sélaciens), suivie d'un refroidissement relatif pendant le reste de la zone à Falciferum, pour la zone à Bifrons et particulièrement la jonction Bifrons-Variabilis (incluant donc la Couche à Crassum, dont la sédimentation est éventuellement liée à ce réchauffement) montrent un réchauffement net avec des valeurs de 23°-26° pour les poissons necto-pélagiques mais de 6-8° de moins pour les bélemnites et les poissons benthiques (Dera et al. 2008), témoignant d'une tranche d'eau suffisante pour enregistrer un tel différentiel. Ce réchauffement et cette tranche d'eau plus importante sont probablement aussi en partie responsables de l'arrivée en Lorraine de nouvelles faunes de raies et requins, totalement différentes des faunes antérieures à Hybodontiformes, Synéchodontiformes et

Hexanchiformes, et déjà présentes en Normandie dès la zone à Tenuicostatum, moins anoxique qu'en Lorraine

Particularités de faciès

Dans tous les gisements explorés, sauf à Dudelange-Zoufftgen, la Couche à Crassum est d'aspect brun et limonitique à la base, riche en cristaux de gypse parfois créant des croûtes de gypse (Soleuvre, Sanem), témoins donc de la présence de pyrite au départ, donc de fond anoxique. A Dudelange-Zoufftgen, la base de la Couche à Crassum, gris-bleu-noir, est encore très riche en pyrite, déjà dégradée néanmoins vu l'abondance de gypse également. Elle est suivie d'environ 1 mètre de calcaire bleuté, puis des argiles jaunâtres (contenant encore un peu de pyrite) évoquant un fond plus oxygéné; ailleurs, la Couche à Crassum pyriteuse est surmontée de couches toujours nettement pyriteuses.

Le niveau 4 est une marne pyriteuse et très calcaire, le niveau 5 est un calcaire induré, pour lequel nous pouvons conclure à une réduction des apports argileux ou à une augmentation de productivité en carbonates, et donc à une eau plus oxygénée, plus claire, plus chaude (voir Dera et al. 2009) avec des caractéristiques de sédimentation différentes. Ce milieu marin différent voit alors soit arriver par courants ou couloirs une nouvelle faune de céphalopodes et de chondrichthyens qui se mêle à la faune autochtone (*Acrocoelites*, actinoptérygiens, hybodontiformes, synéchodontiformes, crocodiles et ichthyosaures, présents dès la base du Toarcien), soit l'évolution locale de la faune autochtone dans cette eau différente.

Planche 4: Ammonites du Toarcien de Dudelange-Zoufftgen.

Fig. 1: *Haugia jugosa* (Sowerby, 1815). Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM200.

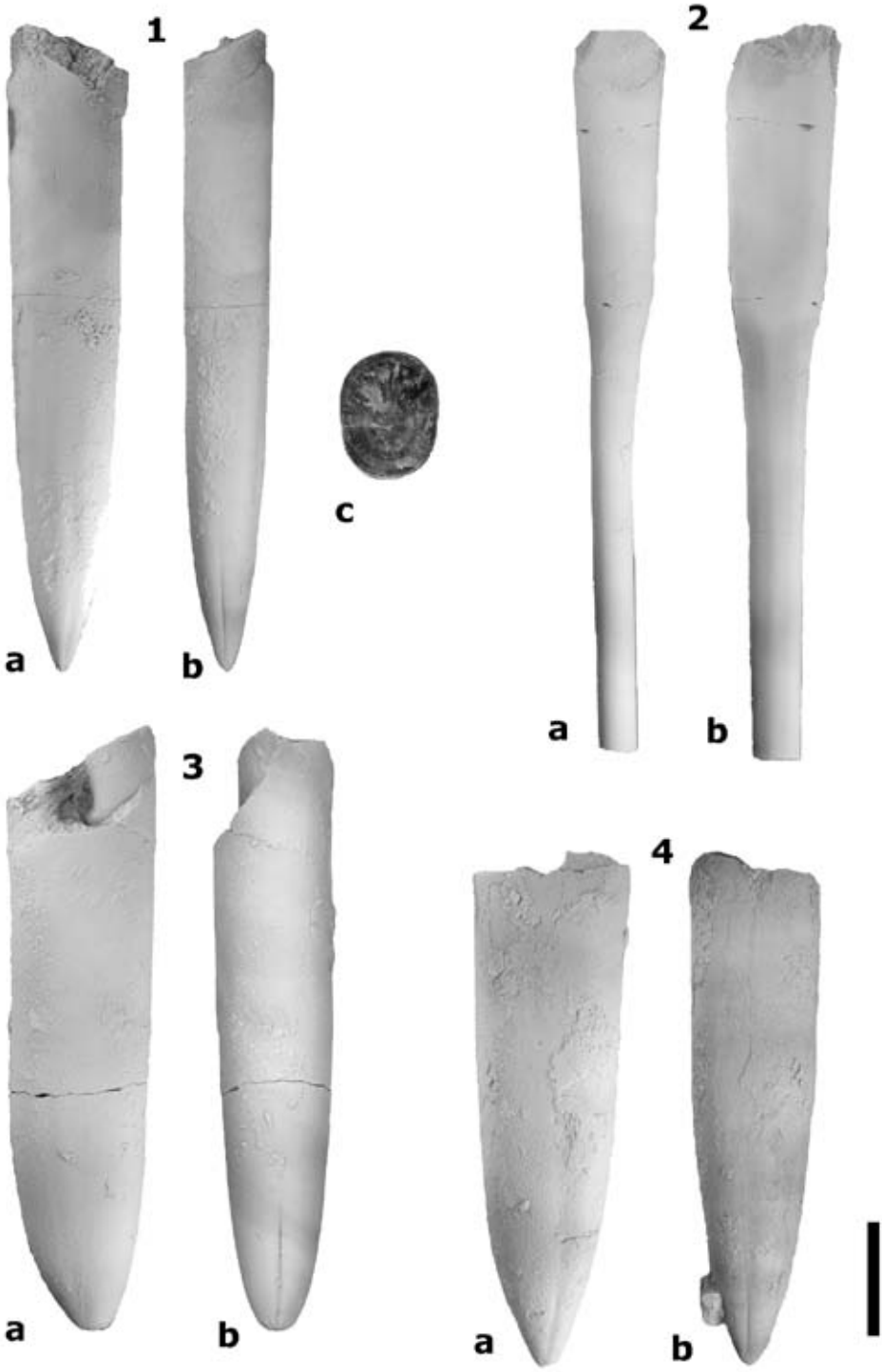
Fig. 2: *Lytoceras cornucopia* (Young & Bird, 1822). Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM177.

Fig. 3: *Phylloceras supraliasicum* (Pompeckj, 1893). Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM181.

Fig. 4: *Haugia navis* (Dumortier, 1874). Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM185.

Fig. 5: *Phymatoceras lilli* (Hauer, 1856). Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM216.

Barre: 1 cm

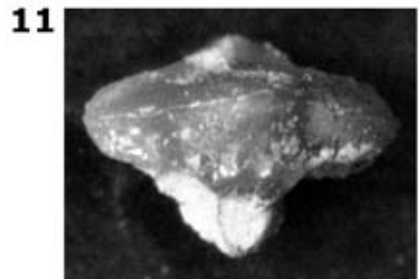
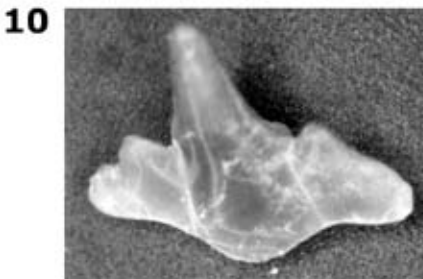
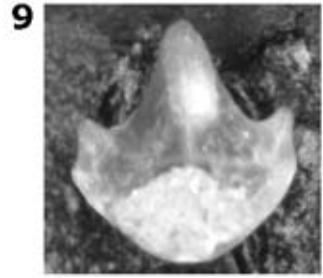
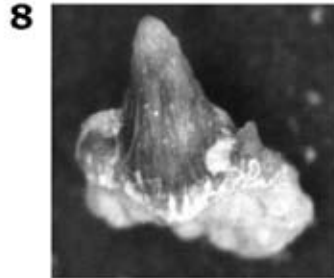
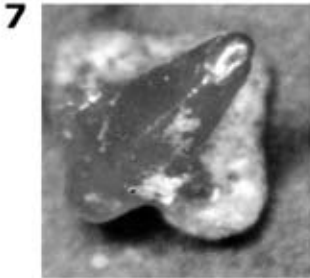
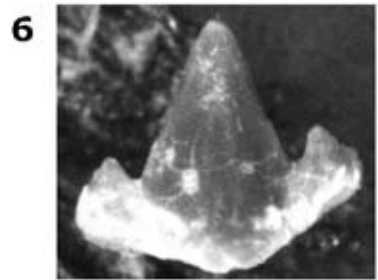
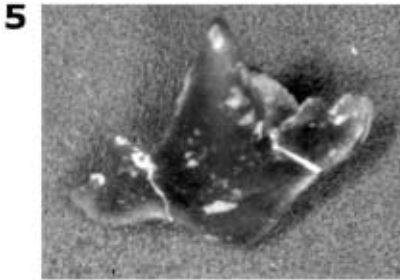
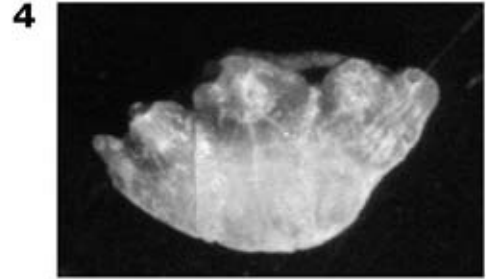
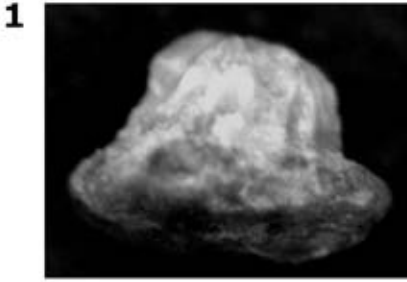


Tabl. 2: Les chondrichthyens dans les diverses zones du Toarcien à l'Est (Lorraine) et à l'Ouest (Normandie) du Bassin de Paris:

Zones	Lorraine	Normandie-Feuguerolles
zone à Aalensis	<i>Rhomphaiodon</i> , <i>Doliobatis</i> , <i>Orectolobiformes</i>	<i>Synechodus</i> , <i>Sphenodus</i> , <i>Paraorthacodus</i> , <i>Microtoxodus</i>
zone à Thouarsense	<i>Synechodus</i> , <i>Protospinax</i> , <i>Orectolobiforme</i> gen et sp nov, " <i>Heterodontus</i> " <i>duffini</i> , <i>Annea maubeugei</i> , <i>Jurobato</i> , <i>Palaeobrachaelurus aperizostus</i> , <i>P. alisonae</i> , <i>Pseudorhina</i> , <i>Archaeobatidae</i> <i>Cristabatis</i> et <i>Toarcibatis</i>	<i>Hybodus hauffianus</i> , <i>Lissodus</i> , <i>Welcommia</i> , <i>Sphenodus</i> , <i>Synechodus</i> , <i>Protospinax</i> , <i>Paracestracion</i> <i>Archaeobatidae</i> , <i>Ornatoscyllium</i> , <i>Annea</i> , <i>Palaeobrachaelurus</i> , " <i>Heterodontus</i> " <i>duffini</i> , <i>Microtoxodus</i>
zone à Variabilis	<i>Synechodus</i> , <i>Protospinax</i> , <i>Orectolobiforme</i> gen et sp nov, " <i>Heterodontus</i> " <i>duffini</i> , <i>Annea maubeugei</i> , <i>Jurobato</i> , <i>Palaeobrachaelurus aperizostus</i> , <i>P. alisonae</i> , <i>Archaeobatidae</i> <i>Cristabatis</i> et <i>Toarcibatis</i>	<i>Hybodus hauffianus</i> , <i>Lissodus</i> , <i>Welcommia</i> , <i>Sphenodus</i> , <i>Synechodus</i> , <i>Protospinax</i> , <i>Paracestracion</i> <i>Archaeobatidae</i> , <i>Ornatoscyllium</i> , <i>Annea</i> , <i>Palaeobrachaelurus</i> , <i>Microtoxodus</i>
Passage zone à Bifrons - zone à Variabilis	<i>Synechodus</i> , <i>Sphenodus</i> , <i>Protospinax</i> , <i>Paracestracion sarstedtensis</i> , <i>Annea maubeugei</i> , <i>Jurobato</i> , " <i>Heterodontus</i> " <i>duffini</i> , <i>Palaeobrachaelurus aperizostus</i> , <i>P. alisonae</i> , <i>Pseudorhina</i> , aff. <i>Corysodon</i> , <i>Phorcynis</i> , <i>Archaeobatidae</i> <i>Cristabatis</i> et <i>Toarcibatis</i>	Mal différenciable en Normandie
zone à Bifrons	<i>Sphenodus</i>	<i>Hybodus hauffianus</i> , <i>Lissodus</i> , <i>Synechodus</i> , <i>Sphenodus</i> , <i>Protospinax</i> , <i>Paracestracion</i> , <i>Ornatoscyllium</i> , <i>Annea</i> , <i>Palaeobrachaelurus</i> , <i>Archaeobatidae</i>
zone à Serpentinum	<i>Hybodus hauffianus</i>	<i>Hybodus hauffianus</i> , <i>Lissodus</i> , <i>Synechodus</i> , <i>Sphenodus</i> , <i>Protospinax</i> , <i>Paracestracion</i> , <i>Annea</i> , <i>Palaeobrachaelurus</i> , <i>Archaeobatidae</i>
zone à Tenuicostatum (sommet)		<i>Synechodus</i> , <i>Protospinax</i> , <i>Archaeobatidae</i> <i>Toarcibatis multicrostata</i>
zone à Tenuicostatum (base)	<i>Hybodus hauffianus</i> , <i>Rhomphaiodon minor</i> , <i>Synechodus</i> , <i>Welcommia terencei</i>	<i>Synechodus</i> , <i>Sphenodus</i> , <i>Paraorthacodus</i>
zones à Margaritatus et à Spinatum	<i>Synechodus</i> , <i>Paraorthacodus</i> , <i>Agaleus</i> , <i>Hexanchiformes</i>	<i>Synechodus</i> , <i>Sphenodus</i> , <i>Paraorthacodus</i>

Planche 5: Bélemnites du Toarcien de Dudelage-Zoufftgen.Fig. 1: *Acrocoelites wrighti* (Oppel, 1856). Niveau 4, zone à Bifrons. MnhnL TM223.Fig. 2: *Dactyloteuthis semistriata* (Münster, 1830). Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM221.Fig. 3: *Dactyloteuthis digitalis* (Blainville, 1827). Niveau 6, zone à Variabilis. MnhnL TM222.Fig. 4: *Acrocoelites levidensis* (Simpson, 1855). Niveau 4, zone à Bifrons. MnhnL TM224.

Barre: 1 cm



Conclusions

L'étude de la coupe de Dudelange-Zoufftgen, comparée à d'autres affleurements de la Grande-région, permet de conclure que la Couche à Crassum constitue un banc-repère valable pour séparer les unités lithostratigraphiques actuellement reconnues par la carte géologique du Luxembourg: en effet, ces marnes, qui varient d'un mince banc conglomératique jusqu'à un banc marno-calcaire plus développé, marquent le passage, assez net, des Couches à *Hildoceras bifrons* (lo2) aux Couches à *Astarte voltzi* (lo3). D'un point de vue biostratigraphique, la position de la Couche à Crassum se révèle plus complexe. En effet, dans la majeure partie du Grand-Duché le banc est très condensé et livre une faune d'ammonites remaniées de la zone à Bifrons, *Catacoeloceras crassum* et *Hildoceras semipolitum*, associées à *Denckmannia malagma* et *Pseudolioceras compactile*, ces dernières caractérisant la zone à Variabilis. Dans ce cas, le banc peut donc être daté de la zone à Variabilis. A Dudelange-Zoufftgen par contre, la sédimentation est plus complète et on peut distinguer un horizon inférieur (avec *Catacoeloceras crassum* et *Hildoceras semipolitum*) daté de la zone à Bifrons et un horizon supérieur (avec *Catacoeloceras* ssp., *Haugia navis*, *Haugia variabilis*, *Pseudolioceras*

compactile), daté de la zone à Variabilis. Une première analyse de l'association des bélemnites confirme cette subdivision faunistique de la Couche à Crassum à Dudelange-Zoufftgen: l'horizon inférieur (niveau 4, zone à Bifrons) est fortement caractérisé par de nombreuses espèces de *Acrocoelites* à affinité anglaise, tandis que l'horizon supérieur (niveau 5, zone à Variabilis) est caractérisé par de nombreux *Dactyloteuthis* à affinité méditerranéenne. En première analyse et sur base du volume limité de sédiments traités, l'étude de l'ichthyofaune ne permet pas de différencier les faunes de poissons et requins des niveaux 4 et 5. Au final, l'éloignement des côtes, la profondeur et la nature de la colonne d'eau et donc des sédiments, conditionnent bien l'ichthyofaune et leur premières apparitions stratigraphiques selon les localités (voir Underwood 2004), ceci s'observe particulièrement bien au niveau du Bassin de Paris dans la comparaison des faunes du Toarcien de Luxembourg/Lorraine, avec celles d'Alsace et de Normandie.

L'analyse sédimentologique et faunistique (intégrant les données isotopiques existantes; voir Dera et al. 2009), indique des changements écologiques importants au Toarcien moyen: un réchauffement extrême à la base de la zone à *Falciferum* (induisant une explosion de la

Planche 6: Dents de requins et raies du Toarcien de Dudelange-Zoufftgen.

- Fig. 1: Hybodontidae indet. Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Diamètre 0.5 mm. MnhnL TM225.
- Fig. 2: *Synechodus* cf. *duffini* Underwood & Ward, 2004. Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Longueur 3 mm. MnhnL TM226.
- Fig. 3: *Protospinax magnus* Underwood & Ward, 2004. Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Longueur 1 mm. MnhnL TM227.
- Fig. 4: *Paracestracion sarstedtensis* (Thies, 1983) Underwood, 2002. Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Longueur 1.1 mm. MnhnL TM228.
- Fig. 5: *Palaeobrachaelurus aperizostus* Thies, 1983. Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Longueur 1.6 mm. MnhnL TM229.
- Fig. 6: *Palaeobrachaelurus alisonae* Thies, 1983. Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Longueur 1.1 mm. MnhnL TM230.
- Fig. 7: *Annea maubeugei* Thies, 1983. Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Longueur 0.8 mm. MnhnL TM231.
- Fig. 8: *Ornatoscyllium* sp. Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Longueur 1 mm. MnhnL TM232.
- Fig. 9: "*Heterodontus*" *duffini* Thies, 1983 (voir Delsate, ce volume). Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Longueur 1.1 mm. MnhnL TM233.
- Fig. 10: *Orectolobiforme* gen. & sp. nov. (voir Delsate, ce volume). Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Longueur 1.4 mm. MnhnL TM234.
- Fig. 11: *Toarcibatis elongata* Delsate & Candoni, 2001. Zone à Thouarsense, sous-zone à Thouarsense-Bingmanni. Longueur 1 mm. MnhnL TM235.

diversité des poissons actinoptérygiens, sans grosse variation pour les sélaciens) est suivie d'un refroidissement relatif pendant le reste de la zone à Falciferum: la zone à Bifrons et particulièrement la jonction Bifrons-Variabilis (incluant la Couche à Crassum, dont la présence sédimentologique est éventuellement liée à ce réchauffement) montre un réchauffement net avec des valeurs de 23°-26° pour les poissons necto-pélagiques mais de 6-8° de moins pour les bélemnites et les poissons benthiques, témoignant d'une tranche d'eau suffisante pour enregistrer un tel différentiel. Ce réchauffement et la profondeur d'eau plus importante sont probablement aussi en partie responsables de l'arrivée en abondance de nouvelles faunes de raies et requins, déjà présentes en Normandie dès la zone à Tenuicostatum, plus oxygénée qu'en Lorraine.

Remerciements

Nous tenons à remercier Georges Bechet et Alain Faber (MnhnL) ainsi que Kurt Meiers, Robert Haas, Josef Höfler, Liette et Guy Kronz-Wilmes et Nico Gross (collaborateurs scientifiques du MnhnL) sans lesquels les fouilles sur le site n'auraient pas été possibles. La direction des Chemins de fer luxembourgeois (CFL) a permis l'accès au chantier et en a assuré la sécurité. Un remerciement particulier va à Marc Chesnier pour le partage de l'étude des chondrichthyens de Feuguerolles, et Simone Guérin-Franiatte pour ses conseils et la détermination des ammonites figurées dans le présent travail. Nora Back et Marianne Kayser nous ont assistés dans la réalisation des figures. Nous remercions pour leurs précieux conseils également Robert Colbach (Service géologique, Luxembourg), Michaël Hermoso (Paris/Oxford), Olivier Pierron (Nancy), Jean-Philippe Blouet (Nancy), Ange Mirabet (Lixhausen), Jean-Luc Piron (Euraceta), Eric Santiquian (Biosemois, Arlon), Paul Vanescote (Gammamedic), Térance Delsate (Mons), Alaoui Benzakroum et Hasna Boutzil (Cerphos, Casablanca). Bernard Lathuilière (Nancy) et Alain Faber (MnhnL) ont relu le manuscrit et contribué à son amélioration par leurs commentaires constructifs.

Références bibliographiques

- Benecke E.W. 1898. - Beitrag zur Kenntnis des Jura in Deutsch-Lothringen. Abhandlungen zur geologischen Spezialkarte Elsass-Lothringens, N.F. 1. Strasbourg.
- Blainville M.H. Ducrotay de 1827. - Mémoire sur les bélemnites, considérées zoologiquement et géologiquement. 136 p. Strasbourg, Levrault.
- Bleicher M. 1892. - Sur le gisement et la structure des nodules phosphatés du Lias de Lorraine. Bulletin de la Société Géologique de France, 3: 237-249.
- Branco W. 1879. - Der untere Dogger Deutsch-Lothringens. Abhandlungen zur Geologischen Spezialkarte von Elsass-Lothringen, 2 (1): 1-160.
- Bruguière J.G., Lamarck J.B. & Deshayes G.P. 1789-1832. - Encyclopédie méthodique ou par ordre des matières. Histoire naturelle des vers, des coquilles et des mollusques. Paris.
- Buckman S.S. 1887-1909. - Monograph of the ammonites of the Inferior Oolite Series. Palaeontographical Society London Monograph, 456 + 262 pp., 103 + 24 pls. London.
- Chapuis F. & Dewalque G. 1854. - Description des fossiles des terrains secondaires de la province de Luxembourg. Mémoires Couronnées et Mémoires Savants Étrangers de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres et des Beaux Arts de Belgique, 25 [1853]: 1-325.
- Corroy G. & Gérard C. 1933. - Le Toarcien de Lorraine et du Bassigny. Bulletin de la Société géologique de France, 3 (5): 193-226. Paris.
- Brun P. de 1932. - Étude géologique et paléontologique des environs de St.-Ambroix (Gard). Troisième partie (Lias supérieur). Bulletin de la Société d'Étude des Sciences naturelles Nîmes, 46-47, 84 pp.
- De Craen M., Swennen R., Keppens E.M., Macaulay C.I. & Kiriakoulakis K. 1999(a). - Bacterially mediated formation of carbonate concretions in the Oligocene Boom Clay of Northern Belgium. Journal of Sedimentary research, 69: 1098-1106.

- De Craen M., Swennen R. & Keppens E. 1999(b). - Petrography and geochemistry of septarian carbonate concretions from the Boom Clay Formation (Oligocène, Belgium). *Geologie and Mijnbouw*, 77: 63-76.
- Delsate D. 1990. - Deux nouveaux horizons à vertébrés (Chondrichthyes-Elasmobranchii et Osteichthyes-Actinopterygii) dans le Toarcien belge et limitrophe (Lorraine). Synthèse stratigraphique et profils nouveaux. Professional Paper 1990-1, n°242, 53 pages. Bruxelles.
- Delsate D. 1992. - Chondrichthyens mésozoïques du Luxembourg. Note préliminaire. Bulletin de la Société des Naturalistes luxembourgeois, 93: 181-193. Luxembourg.
- Delsate D. 1995. - Chondrichthyens mésozoïques du Grand-Duché de Luxembourg. Belgian Geological Survey Professional Paper, 278: Elasmobranchs et Stratigraphie (1994): 11-22. Bruxelles.
- Delsate D. 1997. - Chondrichthyens mésozoïques du Grand-Duché de Luxembourg: Compléments. Travaux scientifiques du Musée national d'Histoire Naturelle de Luxembourg, 27: 53-79. Luxembourg.
- Delsate D. 1999(a). - L'Ichthyofaune du Toarcien luxembourgeois. Cadre général et Catalogue statistique. Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg, 30: 1-101. Luxembourg.
- Delsate D. 1999(b). - Un Pholidophoridae nouveau (Osteichthyes, Actinopterygii) du Toarcien (Jurassique inférieur) luxembourgeois. Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg, 32:141-205. Luxembourg.
- Delsate D. 2004. - Une nouvelle faune de poissons et requins toarciens du Sud du Luxembourg (Dudelange) et de l'Allemagne (Schömberg). Bulletin de l'Académie Lorraine des Sciences, 42 (1-4): 13-49.
- Delsate D. & Candoni L. 2001. - Description de nouveaux morphotypes dentaires de Batomorphii toarciens (Jurassique inférieur) du Bassin de Paris: Archaeobatidae nov. fam. Bulletin de la Société des Naturalistes luxembourgeois, 102: 131-143.
- Delsate D. & Felten R. 2005. - Les poissons. In Fayard J.-P., Gross N., Lajournade J.-B., Lathuilière B., Vailly G. & Weis R. (coord.), Fossiles et minéraux de la carrière d'Ottange-Rumelange. 152 pp. Association lorraine amateur de géologie, Thionville; Amis de la géologie, minéralogie et paléontologie, Bous.
- Delsate D. & Godefroit P. 1995. - Chondrichthyens du Toarcien inférieur d'Aubange (Lorraine belge). Belgian Geological Survey, Professional Paper, 278: 23-44. Bruxelles.
- Delsate D., Henrotay M. & Godefroit P. 1992. - Présence d'insectes dans le Toarcien inférieur de la Belgique. Bulletin de la Société belge de Géologie, 111 (2): 147-153. Bruxelles.
- Delsate D. & Lepage J.C. 1990. - Découverte d'une faune originale d'Elasmobranches dans les phosphates du Toarcien lorrain (couches à *Coeloceras crassum*). Bulletin de l'Académie Lorraine des Sciences, 29 (3): 153-161. Nancy.
- Delsate D. & Maubeuge P.L. 2000. - Le Toarcien inférieur des régions de Bascharage et de Bettembourg (Grand-Duché de Luxembourg). A propos d'une soi-disant émergence fugitive, ou d'environnements restreints proches de l'émergence. Archives de l'Institut Grand-ducal de Luxembourg, Section sciences naturelles, physique, mathématiques, N.S. 43: 55-71.
- Delsate D. & Thies D. 1995. - Teeth of the fossil shark *Annea* Thies 1983 (Elasmobranchii-Neoselachii) from the Toarcian of Belgium. Belgian Geological Survey, Professional Paper, 278: 45-64. Bruxelles.
- Denckmann A. 1887. - Ueber die geognostischen Verhältnisse der Umgegend von Dörnten nördlich Goslar, mit besonderer Berücksichtigung der Fauna des oberen Lias. Abhandlungen zur geologischen Specialkarte Preussens, 8 (2), 108p.
- Dera G., Martinez M., Delsate D., Neige P., Pucéat E., Pellenard P. & Joachimski M. 2008. - Paleoecology of early Jurassic belemnites: a new contribution by $\delta^{18}O$ analyses of Pliensbachian - Toarcian belemnites from Belgium and comparison with fish tooth data. In: Faber A., Weis R. & Fuchs D. (eds.), Coleoid Cephalopods Through Time - 3rd International Symposium, Luxembourg 08-11.10.2008. Abstract volume, pp. 67-68. Luxembourg, Musée national d'histoire naturelle.

- [Dera G., Pucéat E., Pellenard P., Neige P., Delsate D., Joachimski M., Reisberg L. & Martinez M. 2009. - Water mass exchange and variations in seawater temperature in the NW Tethys during the Early Jurassic: evidence from neodymium and oxygen isotopes of fish teeth and belemnites. \(sous presse\)](#)
- Dittrich D. 1993. - Erläuterungen zur geologischen Karte von Luxemburg, 1.25000: Blatt Nr. 11 Grevenmacher und Blatt Nr. 13 Remich. Publications du Service Géologique du Luxembourg, 51 p.
- [Doyle P. 1987. - Lower Jurassic-Lower Cretaceous belemnite biogeography and the development of the Mesozoic boreal realm. Palaeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 61: 237-254.](#)
- Doyle P. 1990. - The British Toarcian (Lower Jurassic) belemnites. Monograph of the Palaeontological Society, Part 1: 1-49.
- Doyle P. 1992. - The British Toarcian (Lower Jurassic) belemnites. Monograph of the Palaeontological Society, Part 2: 50-79.
- Dumortier E. 1864-1874. - Etudes paléontologiques sur les dépôts jurassiques du Bassin du Rhône. Paris, Ed. Savy. (4 tomes)
- Elmi S., Rulleau L., Gabilly J. & Mouterde R. 1997. - Ammonites, Toarcien. In Groupe français d'étude du Jurassique, Cariou E. & Hantzpergue P. (coord.), Biostratigraphie du Jurassique ouest-européen et méditerranéen. Zonations parallèles et distribution des invertébrés et microfossiles. Bulletin du Centre des Recherches Elf Exploration-Production, 17: 157-167. Pau.
- [Fuchs D. & Weis R. 2008. - Taxonomy, morphology and phylogeny of Lower Jurassic loligosepiid coleoids \(Cephalopoda\). Neues Jahrbuch für Geologisch-Paläontologische Abhandlungen, 249/1: 93-112. Stuttgart.](#)
- [Godefroit P. 1994. - Les reptiles marins du Toarcien \(Jurassique inférieur\) belgo-luxembourgeois. Service Géologique de Belgique, mémoire 39: 1-98.](#)
- Guérin-Franiatte S., Maquil R. & Münzberger P. 2010. - Le Toarcien au Grand-Duché de Luxembourg: Biostratigraphie dans la région de Belvaux. Ferrantia, Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg. (in press)
- Hanzo M. 1978. - A propos de nodules carbonatés du Toarcien inférieur de la région de Bettembourg (Grand-Duché de Luxembourg). 103^{ème} Congrès national des sociétés savantes, Nancy, fascicule IV, pp. 343-349.
- [Hanzo M. 1979. - Milieu de dépôt et évolution diagénétique des argilites toarciennes d'après l'étude de nodules carbonatés des "Schistes carton" de Bettembourg \(Grand-Duché de Luxembourg\). Sciences de la Terre Nancy, 23: 45-59.](#)
- Hanzo M. 1980(a). - Lorraine. Lias supérieur. In Mégnien F. (coord.), Synthèse Géologique du Bassin de Paris. Volume 3. Lexique des noms de formation. Mémoire BRGM 103: 60.
- Hanzo M. 1980(b). - Bacourt (Marnes de). In Mégnien C. & F. Mégnien (coord.), Synthèse Géologique du Bassin de Paris. Volume 1. Stratigraphie et paléogéographie. Mémoire BRGM 101: 95.
- Hauer F. 1856. - Ueber die Cephalopoden aus dem Lias der Nordöstlichen Alpen. Denkschriften der Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, 11: 1-56.
- [Hedberg H. 1976. - International stratigraphic guide. A guide to stratigraphic classification, terminology and procedure. Wiley & Sons.](#)
- Henrotay M., Marques D., Paichelier J.C., Gall J.C. & Nel A. 1998. - Le Toarcien inférieur des régions de Bascharage et de Bettembourg (Grand-Duché de Luxembourg): évidences paléontologiques et sédimentologiques d'environnements restreints proches de l'émersion. Geodiversitas 20: 263-284.
- Hermoso M. 2007. - Les perturbations environnementales au cours du Toarcien inférieur. Apport de l'étude sédimentologique et géochimique de séries boréales et ouest-téthysiennes. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- [Hermoso M., Minoletti F., Le Callonnec L., Jenkyns H. C., Hesselbo S. P., Rickaby R. E., Renard M., de Rafélis M. & Emmanuel L. 2009\(a\). - Global and local forcing of Early Toarcian seawater chemistry: A comparative study of different paleoceanographic settings \(Paris and Lusitanian basins\). Paleocanography, 24 PA4208, 15 p.](#)