

Table des matières

| | |
|--|----------------------|
| Résumé..... | 2 |
| 1. Introduction..... | 2 |
| 2. Matériels et méthodes..... | 4 |
| 2.1. <i>Cadre paléogéographique.....</i> | 4 |
| 2.2. <i>Contexte géologique générale.....</i> | 5 |
| 2.3. <i>Présentation de la coupe de Dotternhausen : description des échantillons et données géochimiques.....</i> | 6 |
| 2.4. <i>Techniques de préparation et d'analyse des échantillons.....</i> | 7 |
| 2.4.1. <i>Méthodes de préparation des échantillons pour l'étude au MEB.....</i> | 9 |
| 2.4.2. <i>Préparation des échantillons à l'analyse spectrale.....</i> | 11 |
| 2.4.3. <i>Programmation algorithmique en langage IDL® et analyse d'image.....</i> | 12 |
| 2.4.4. <i>Traitement du spectre brut en niveaux de gris.....</i> | 12 |
| 2.4.5. <i>Principe de l'analyse spectrale.....</i> | 14 |
| 2.4.6. <i>Sélection des gammes de fréquences significatives.....</i> | 15 |
| 2.4.7. <i>Test de significativité des fréquences échantillonnées.....</i> | 16 |
| 2.4.8. <i>Durée de l'évènement anoxique ; modèle d'âge.....</i> | 17 |
| 3. Résultats..... | 18 |
| 3.1. <i>Description des nanofaciès.....</i> | 18 |
| 3.1.1. <i>Faciès argileux.....</i> | 18 |
| 3.1.2. <i>Faciès carbonaté.....</i> | 22 |
| 3.1.3. <i>Origine des micarbs observés dans certains faciès.....</i> | 30 |
| 3.2. <i>Nanofossiles identifiés et analyse statistique de leur distribution dans le sédiment.....</i> | 30 |
| 3.2.1. <i>Abondance relative des nanofossiles et leur distribution stratigraphique.....</i> | 30 |
| 3.2.2. <i>Analyse factorielles des correspondances de la distribution des nanofossiles.....</i> | 32 |
| 3.3. <i>Généralités sur les cyclicités d'origines connues.....</i> | 33 |
| 3.4. <i>Fréquences de cycles identifiables dans les carottes analysées.....</i> | 35 |
| 3.5. <i>Mise en évidence d'un signal primaire au sein des assemblages en nanofossiles.....</i> | 38 |
| 4. Discussion et interprétation..... | 39 |
| 4.1. <i>Diagenèse, préservation des nanofossiles.....</i> | 39 |
| 4.2. <i>Cyclicités dans le signal primaire des nanofossiles.....</i> | 40 |
| 4.3. <i>Evolution paléoenvironnementale déduite des nanofaciès dans la zone à faciferum.....</i> | 42 |
| 4.3.1. <i>Les paléoenvironnement des niveaux argileux.....</i> | 42 |
| 4.3.2. <i>Les paléoenvironnements des bancs carbonatés.....</i> | 43 |
| 4.4. <i>Relation statistique entre taxon et faciès.....</i> | 44 |
| 4.5. <i>Comparaison des textures argileuses des black shales de Dotternhausen et les Schistes Carton du bassin de Paris.....</i> | 45 |
| 4.6. <i>Significations des cyclicités reconnues par l'analyse spectrale.....</i> | 45 |
| 5. Conclusions..... | 47 |
| 6. Perspectives..... | 48 |
| Remerciements..... | 48 |
| Références..... | 49 |
| Abstract..... | en couverture au dos |

Résumé

Les black shales du Toarcien inférieur (Schistes Carton en France, Jet Rock en Angleterre, schistes à Posidonie en Allemagne) sont des sédiments formés par de fines alternances de lamines millimétriques à sub-millimétriques claires et sombres. Cette étude a été effectuée sur des surfaces polies de carottes provenant d'un forage de black shales du sud-ouest de l'Allemagne sur le site de Dotternhausen. Les couleurs de la lamination tirent leur origine de la proportion de carbonate de calcium produit en partie par l'accumulation de pelotes fécales contenant du nannoplancton calcaire (lamine claire) et de la proportion de matière organique associée à l'argile (lamine sombre). La forte accumulation et préservation de matière organique résultent d'un événement anoxique global au Toarcien inférieur. Les faibles épaisseurs typiques de ces dépôts (5 à 25 m) et la longue durée de l'intervalle temps correspondant à la mise en place de ces black shales (de l'ordre de 0,85 à 1 Ma selon les auteurs) sont caractéristiques d'une période de condensation sédimentaire. Afin de comprendre la genèse des lamines et leur cyclicités, une étude au MEB du faciès ainsi que du contenu en nannofossile, est complétée par des analyses spectrales sur les nuances de couleur (niveaux de gris) des lamines. Il en ressort des cyclicités hiérarchiques dans la lamination et les assemblages en nannofossiles, qui suivent des gammes de fréquences récurrentes. Ces alternances seraient issues de fluctuations de différents paramètres environnementaux guidés par des facteurs solaires, orbitaux et climatiques) plus ou moins en interaction, ayant opéré à de multiples échelles temporelles. Les principaux résultats de cette étude sont : (1) la mise en évidence de cycles liés à l'obliquité de l'orbite terrestre (~40ka) qui normalement ne sont pas enregistrés à basses latitudes ; (2) la présence de différents cycles à plus haute fréquence comprenant les cycles solaires et des cycles propres au système Terre. Les lamines se sont formées en phase avec les cycles orbitaux et solaires tandis que les associations à nannofossiles varient en fonction des cycles solaires.

1. Introduction

Le Toarcien inférieur de la Téthys occidentale a été marqué par des changements paléoenvironnementaux majeurs associés à un régime tectonique distensif de ce secteur de la Téthys. Un événement anoxique globale (Oceanic Anoxique Event : OAE), souligné par une accumulation et préservation accrues de matière organique et une forte anomalie négative du signal isotopique en $\delta^{13}\text{C}$, a affecté les différents bassins du domaine occidental de la Téthys à la base du Toarcien (Jenkyns, 1988 ; Röhl et al., 2001). Cet OAE est également associé à une crise majeure de la production carbonatée des plates-formes et une importante condensation des séquences sédimentaires (Dromart et al., 1996) à dominante argileuse. Ces conditions du milieu sont en relation avec des modifications paléocéanographiques importantes. Une sédimentation finement laminée riche en matière organique constitue les black shales de plusieurs bassins européens au Toarcien.

Au Jurassique inférieur le seuil méditerranéen en gestation subit une forte distension (Fig. 1), conduisant l'occupation de plusieurs dépressions par la croûte océanique (Disnard et al., 1996). Des sillons entamèrent les plates-formes carbonatées associés avec une transgression importante généralisée durant le Jurassique inférieur qui atteint son maximum au Toarcien moyen (de Graciansky et al., 1998). Un océan profond séparait donc l'Europe du continent africain. Les environnements les plus répandus de la marge nord-ouest téthysienne sont ceux des plates-formes terrigènes qui se développèrent dans un large domaine néritique influencé par le continent (Fig. 1). En effet, l'Europe occidentale était en grande partie recouverte par un complexe de mers épicontinentales formant un vaste paysage d'archipel à topographies très modestes, reliques du relief varisque (Disnard et al., 1996).

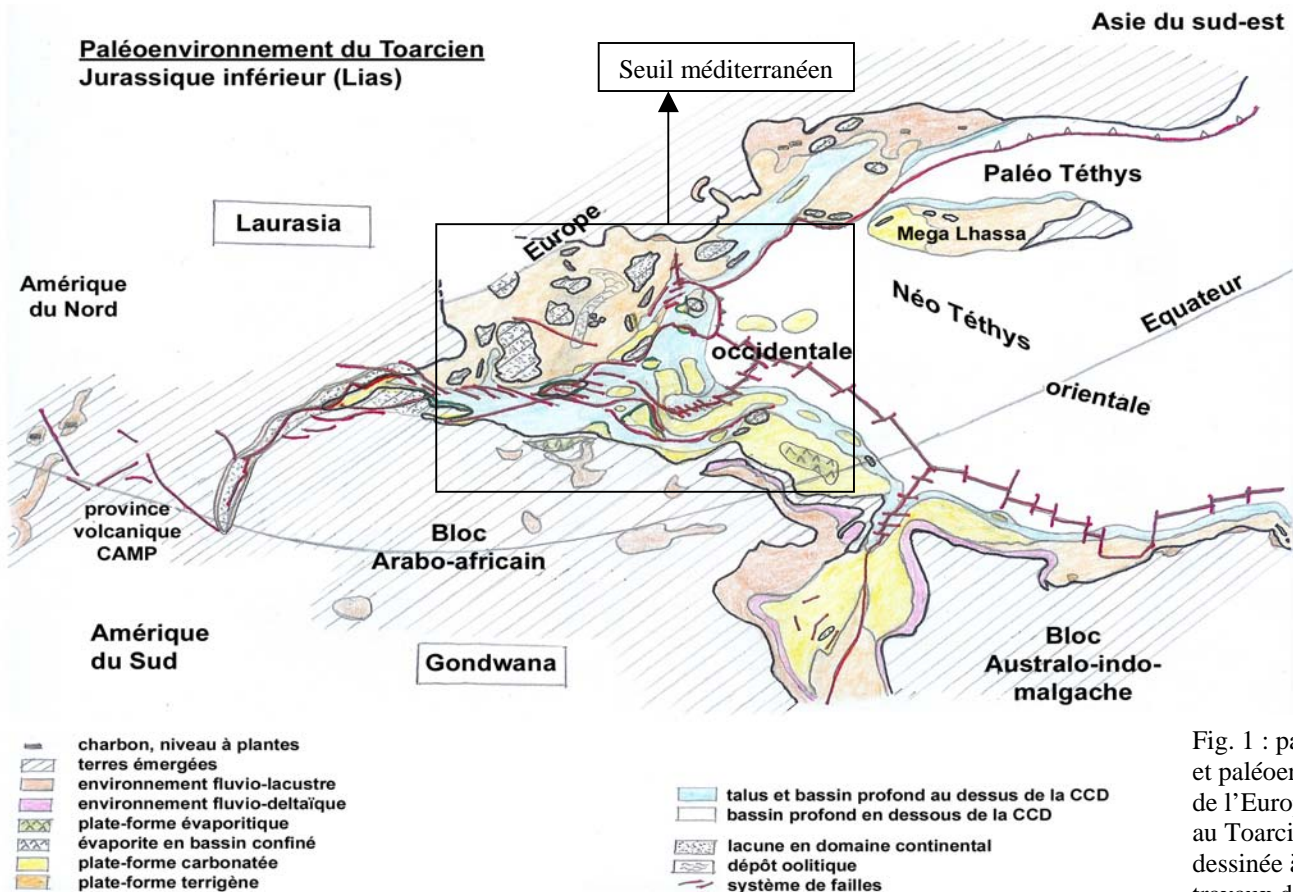


Fig. 1 : paléogéographie et paléoenvironnement de l'Europe de l'Ouest au Toarcien (carte dessinée à partir des travaux de Dercourt et al., 2000).

Ce système néritique se compose de plusieurs bassins plus ou moins isolés ou connectés du domaine océanique téthysien (au Sud) et boréal (au Nord) en réponse à l'eustatisme (Disnard et al., 1996). Ces milieux néritiques qui peuvent fonctionner comme des bassins à seuil dans leur histoire, sont alimentés en matériaux d'origine continentale via les apports des systèmes fluviaux issus du démantèlement des reliefs résiduels (Dercourt et al., 2000). Ce processus permet le développement d'un dépôt de faciès argilo-détritique très fin, assez riche en matière organique d'origine généralement marine, pouvant être entre-coupé d'épisodes carbonatés lorsque les apports continentaux sont réduits (Röhl et al., 2001). A l'échelle tectonique régionale, la structuration des bassins d'Europe serait principalement contrôlée par la subsidence dans un contexte de tectonique distensive au Jurassique inférieur (Disnard et al., 1996).

La combinaison des facteurs de circulation océanique, bathymétrie et structuration des bassins sédimentaires est vraisemblablement à même d'expliquer la bonne préservation de la matière organique et le dépôt des particules sédimentaires en fines lamines planes-parallèles (Disnard et al., 1996). En effet, la configuration des bassins et la circulation océanique peuvent engendrer une stratification des eaux et limiter l'oxygénation au fond des bassins (Wignall, 1999), conditions favorisant ainsi un dépôt en fines lamines (absence de bioturbation mixant le sédiment ; Röhl et al., 2001). Des sédiments finement laminés ont été interprétés comme le résultat d'un régime de dépôt saisonnier, comme dans la Mer Noire actuelle (Wignall, 1999). Cette hypothèse a été reprise pour le Kimméridgien par Lees et al. (2004) et pour le Toarcien par Hesselbo et al. (2000), tandis que Hallam (1997) toujours pour le Toarcien exclue une origine annuelle.

Les sédiments d'âge Toarcien en Europe sont bien exprimés surtout dans le bassin de Paris (faciès des schistes Carton) mais ils ne sont pas uniquement spécifiques de cette région (Ziegler, 1982). D'autres aires géographiques ont été soumises à ce régime de sédimentation, telles que le bassin germanique (Posidonia shales à Dotternhausen), le bassin du Yorkshire en Angleterre ou encore celui Chalzac au Sud de la France. (Fig. 2).

Le cas du bassin sud-ouest germanique au Toarcien inférieur illustrant cette tendance environnementale, a été documenté. De multiples études pluridisciplinaires (géochimie, paléontologie, sédimentologie) sur la coupe de Dotternhausen ont été effectuées (Röhl et al., 2001), de même qu'un certain nombre de carottes ont été prélevées sur le site et mise à notre disposition pour cette étude. Ce matériel carotté permet d'avoir un échantillonnage en continu couvrant l'ensemble de l'évènement anoxique. L'objectif de cette étude sera de comprendre les mécanismes de dépôt de ces sédiments finement laminés du Toarcien basal (caractérisation de nannofaciès), mais aussi de rechercher l'existence de périodicités cycliques dans la lamination d'une part (fluctuation de la couleur des lamines) et les assemblages en nannofossiles d'autre part. L'étude de ces dépôts, de part la régularité des laminations et du taux d'accumulation (Röhl et al., 2001), l'absence de bioturbation et d'agitation, s'avère particulièrement intéressante pour établir l'existence de cyclicités sédimentaires de très hautes fréquences (dizaines à centaines d'années). Ces cycles à haute fréquence, potentiellement reconnaissables dans la succession des lamines, seraient susceptible de dépendre de facteurs externes au bassin considéré (allocyclique), comme les variations climatiques et eustatiques contrôlées par des paramètres astronomiques (cycles orbitaux de la Terre et cycles solaires). Ces processus externes au bassin peuvent refléter la réaction du système global océan-atmosphère à ces paramètres astronomiques.

Pour mener à bien ce travail, deux techniques d'études complémentaires ont été appliquées sur les sédiments carottés :

- L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) permettant la caractérisation des assemblages de nannofossiles (abondance relative, richesse spécifique, distribution dans le cortège sédimentaire) et des nannofaciès indicatifs des conditions du milieu de dépôt (niveau tropique, agitation, température, stratification de la tranche d'eau),
- L'analyse spectrale sur les niveaux de gris des carottes pour la recherche des périodicités astronomiques (solaires et orbitales) qui sont susceptibles d'expliquer l'origine des laminations observées dans les black shales.

2. Matériel et méthodes

Les sédiments du Toarcien inférieur traités au cours de cette étude, plus communément appelés Schistes à Posidonie, proviennent du site de Dotternhausen localisé dans le Bassin sud-ouest Germanique. Cette localité est géologiquement connue pour ses grandes concentrations en ammonites pyriteuses très bien préservées ainsi que pour la finesse de la sédimentation, un peu comme celle de Holzmaden situé dans le même cadre paléogéographique (Dercourt et al., 2000).

2.1. Cadre paléogéographique

Cette région fait partie du shelf Nord européen qui était caractérisé par une série de bassins semi-isolés épicontinentaux et de faible profondeur (en moyenne 50 m), séparés par des zones émergées (Fig. 2). Selon l'oscillation de troisième ordre du niveau marin relatif (0,5 à 3 Ma *sensu* ; Vail et al., 1991), les bassins peuvent se retrouver isolés des influences océaniques externes via l'émergence périodique des seuils marginaux. Le site de Dotternhausen ainsi que le matériel du Lias terminal, se situe en bordure sud du Bassin Germanique (Fig. 3).

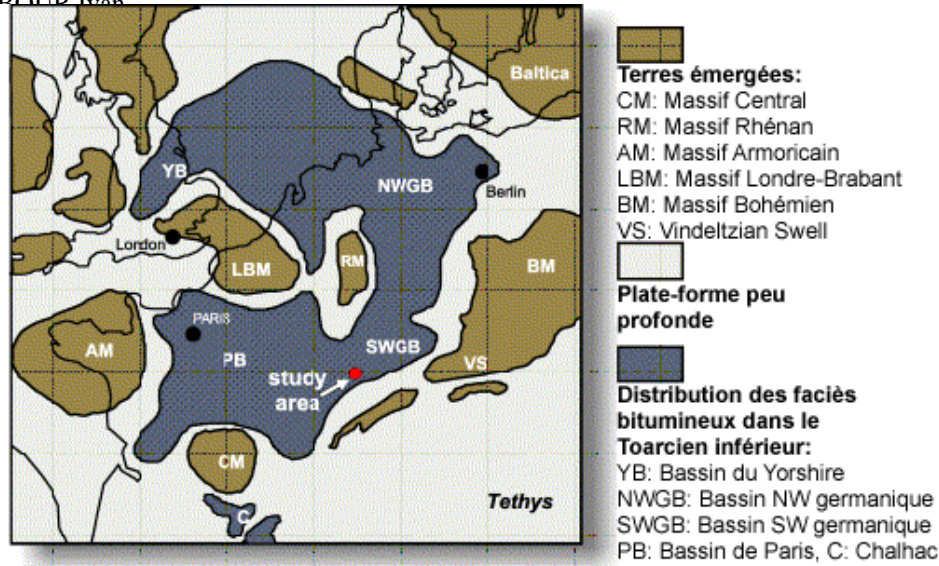


Fig. 2: carte paléogéographique simplifiée du secteur du shelf épicontinental Liasique entre Baltica et Laurentia d'après Ziegler (1982) montrant le secteur d'étude.

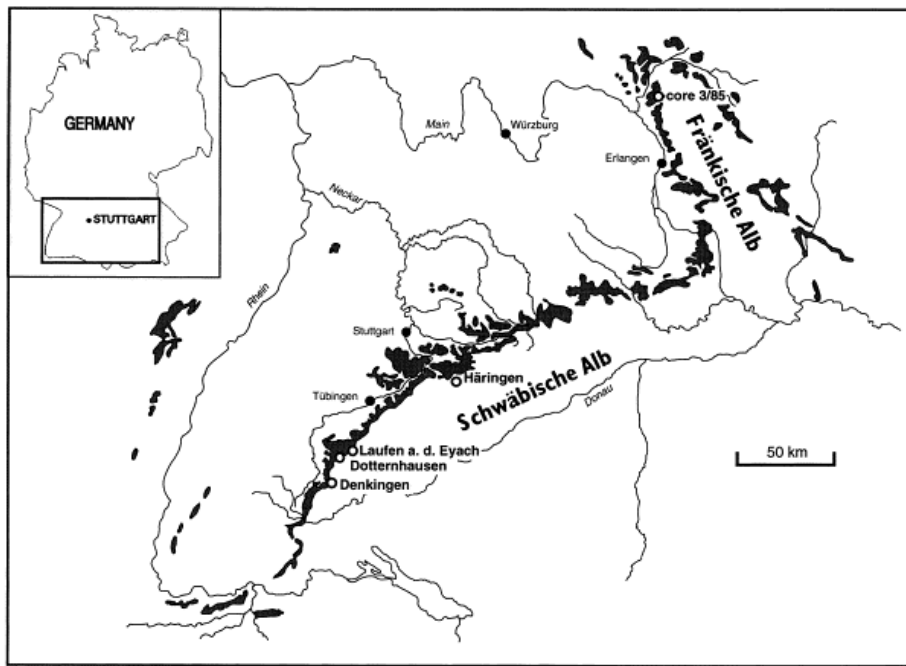


Fig. 3: carte de localisation des sédiments bitumineux du Toarcien inférieur du Sud Allemagne (Röhl et al., 2001)..

2.2. Contexte géologique générale

La sédimentation dans la région de Dotternhausen est majoritairement argileuse au Toarcien inférieur. Elle est formée par des lamines millimétriques à submillimétriques claires et sombres, preuve d'un mode de dépôt dans un environnement relativement calme et isolé. En effet, la structuration du bassin (présence de seuil) et sa profondeur faible, sont des conditions insuffisantes pour permettre le développement de courant de fond mais suffisantes pour atténuer l'intensité des tempêtes et soustraire l'interface eau-sédiment à la zone d'action des vagues de tempêtes (Disnard et al., 1996, Röhl et al., 2001). Des courts épisodes carbonatés, probablement liés à des augmentations de la productivité du nannoplancton calcaire, viennent interrompre la monotonie de la série stratigraphique. Ces niveaux carbonatés peuvent être accompagné de niveaux à tempestite de l'ordre du centimètre, drainant des matériaux terrigènes ou carbonatés plus grossiers (Oberer Stein ; Fig. 5). Les sédiments sont fortement condensés. Pour le Toarcien inférieur, une épaisseur d'environ 7.5 m correspondrait à une durée de 2.7 Ma d'après l'échelle chronologique de Gradstein et al. (1995).

Le faciès argileux est fortement enrichi en matière organique (kérogène type II) d'origine marine (Röhl et al., 2001). Au début du Toarcien, les conditions anoxiques ont régné pendant

le dépôt (faible taux d'O₂, bas niveau marin ; Kauffman, 1978, 1981), d'où la forte accumulation de matière organique. Des courtes périodes d'oxygénation des eaux de fond ont été toutefois documentées par Röhl et al. (2001). L'épisode anoxique est marqué par une baisse drastique de la diversité et de l'abondance des compositions fauniques et floristiques, la macrofaune est complètement absente. L'anoxie est induite par les conditions stagnantes (euxinique) de la colonne d'eau profonde qui est couplée à une stratification du corps d'eau, excluant pratiquement la vie benthique.

La stratification, en générale, indique un environnement de dépôt très calme, qui n'a pas été troublé par des courants, des vagues ou encore par l'activité des organismes endobiontes.

2.3. Présentation de la coupe de Dotternhausen : description des échantillons et données géochimiques

La série du Toarcien sud-germanique a été divisée en plusieurs zones d'ammonites, elles mêmes subdivisées en sous-zones (Riegraf et al., 1985). Les noms allemands locaux sont utilisés pour représenter les unités lithostratigraphiques (Quenstedt, 1843, 1858 ; Hauff, 1921) (Fig.4).

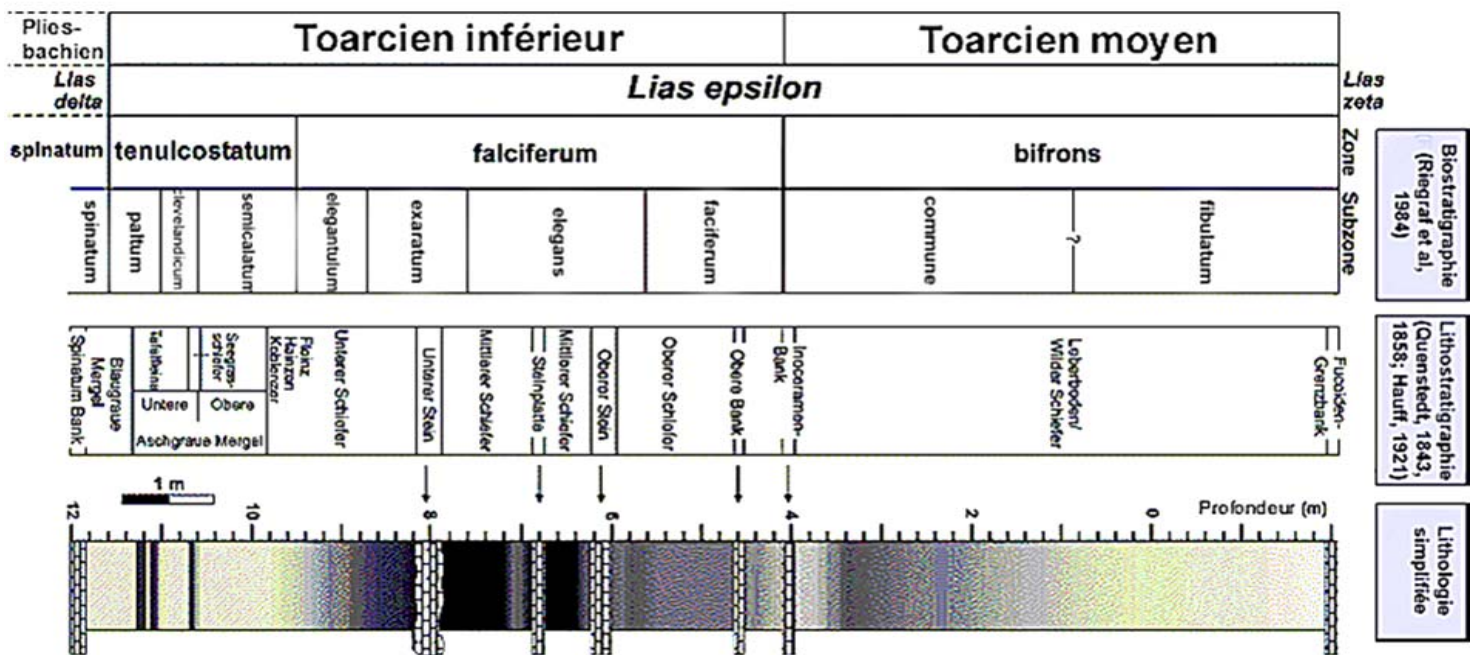


Fig. 4 : Découpage litho-, bio- et chronostratigraphique de la coupe de Dotternhausen, d'après Röhl et al., 2001.

Les sédiments analysés dans ce travail sont issus d'un carottage de roche argilo-carbonatée dans la partie basale du Toarcien (Fig. 4 et Fig. 5). Les neuf carottes cumulées à d'autres prélèvements correspondent à une épaisseur de trois mètres. L'ensemble de la carotte couvre l'évènement anoxique et l'excursion négative du $\delta^{13}\text{C}$. Les différentes portions de carottes sont représentées dans la figure composite 5. Le matériel est un mudstone facilement délitable. Il est formé par une lamination serrée et monotone, facilement perceptible grâce aux changements de la coloration corrélables à une variation de la teneur en carbonate. Les lamines claires sont formées par du carbonate de calcium produit en partie par l'accumulation des nannofossiles. Les lamines sombres quant à elles résultent de l'accumulation de matière organique mêlée à l'argile qui est majoritaire (Röhl et al., 2001). Certains horizons carbonatés massifs (Oberer Stein) présentent une meilleure lithification ; ils ont une lamination plus

discrète liée à un granoclassement indiquant un dépôt de tempête. Ces intervalles à tempestites sont absents des dépôts à dominance argileuse. Il n'y a aucun facteur biologique ou physique qui viennent perturber la monotonie des laminations, l'environnement de dépôt est calme.

D'une manière générale, les sédiments toarciens de Dotternhausen constituent un système à quatre composant : matériaux silicoclastiques, pyrite, carbonate, et matière organique (Fig. 6 ; Röhl et Schmid-Röhl, 2004). Cette dernière montre des proportions comprises entre 0 et 15%. Les principaux constituants silicoclastiques et carbonatés montrent une covariation inverse et indiquent des fluctuations dans l'arrivée de matériel silicoclastique et/ou des taux variables de paléo-production de nanoplancton calcaire (parties minéralisées de *coccolithophoridae* et *schizosphaerella*) qui a été principalement déposé dans des pelottes fécales. La grande quantité de soufre (~90 %) du sédiment est incorporée sous forme de pyrite (FeS_2) framboïdale (Röhl et al, 2001).

La signature de l'évènement anoxique à la base du Toarcien est très bien soulignée par la morphologie des courbes isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$), du TOC (Total Organic Carbon) ou encore de l'abondance totale en nanofossiles (Mattioli et al., 2004). L'épuisement maximal en oxygène traduit par les fortes valeurs en TOC et le décalage négatif extrême des valeurs $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (-34‰) s'est produit pendant le début de la zone à *falciferum* (Mattioli et al., 2004). Dans cet intervalle, des conditions dans les eaux de fond fortement défavorables à la vie benthique sont enregistrées (absence totale de faune benthique ; Röhl et al., 2001). Les algues jaunes-brunes tributaires de la photosynthèse telles que les coccolithophoridées (phytoplancton) subsistent malgré tout en faible quantité pendant tout l'intervalle critique. Les dinoflagellés sont remplacés dans le palynofaciès par des algues vertes (Mattioli et al., 2004).

La disponibilité en oxygène est principalement liée aux changements du niveau marin (Röhl et al., 2001). Les conditions anoxiques conduisant à l'exclusion de la faune benthique ont existé pendant une phase de stagnation maximale et d'un échange extrêmement restreint de l'eau avec les mers voisines lors d'un stade de bas niveau marin (Fig.6). Une reprise de l'oxygénation de l'eau de fond s'est produite pendant l'épisode de haut niveau marin de la sous zone à *falciferum* sommitale (Fig. 6).

Dans les lits calcaires (par exemple Unterer Stein, Steinplatte et Oberer Stein), là où le contenu de carbonate atteint plus de 90 %, une précipitation diagénétique significative de carbonate de calcium est corrélée à une forte variation négative du $\delta^{13}\text{C}$ carbonate (Röhl et al., 2001).

2.4. Techniques de préparation et d'analyse des échantillons

Toutes les observations des nanofaciès ont été effectuées sur un Microscope Electronique à Balayage (MEB) de type Hitachi s800 au Centre de Microscopie Universitaire.

L'examen qualitatif au MEB du nanofaciès est complété avec une étude quantitative des cycles sédimentaires qui sont susceptibles de refléter les fluctuations climatiques induites par des variations orbitales ou solaires. L'identification des cycles astronomiques dans l'enregistrement sédimentaire nécessite la prise en compte d'un paramètre fondamental : la fréquence, qui sera contrainte par l'analyse spectrale. Une comparaison entre les différents nanofaciès reconnus et les données issues de l'analyse spectrale permettra ensuite de relier cyclicités et paramètres environnementaux.