A Monsieur Louis GRAUVOGEL

SOMMAIRE

	Pages
Avant-Propos	7 11
Première partie : ÉTUDE PALÉONTOLOGIQUE DU GRÈS À VOLTZIA	15
Chapitre 1 : La faune Chapitre 2 : Les témoins de l'activité biologique Chapitre 3 : La flore Conclusion à l'étude paléontologique	19 65 75 79
Deuxième partie : ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE ET PALEOECOLOGIQUE DU GRES A VOLTZIA	85
I - Limites et subdivisions stratigraphiques II - Etude sédimentologique et paléoécologique A - Le Grès à meules	87 93 93
Chapitre 1 : Les grès sains Chapitre 2 : Les grès à plantes Chapitre 3 : Les niveaux argileux Chapitre 4 : Les niveaux carbonatés Le paysage du Grès à meules	95 111 117 137 143
B – Le Grès argileux	147
Chapitre 1 : Les grès à dalles Chapitre 2 : Les bancs argileux Chapitre 3 : Les bancs carbonatés Le paysage du Grès argileux et le passage au Muschelkalk	149 153 157 161
C - Etude des paléocourants	165
D - Les argiles du Grès à Voltzia. Etude minéralogique et géochimique Troisième partie : CONCLUSIONS SUR LES PAYSAGES ET LES ÉVOLUTIONS GÉO- CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DU GRÈS À VOLTZIA. LE MONDE	169
VIVANT À L'ÉPOQUE DU BUNTSANDSTEIN SUPÉRIEUR	179
Summary Zusammenfassung Bibliographie Annexe I - Liste des carrières étudiées et localisation des principaux gisements fos-	191 195 199
silifères	295
Annexe II - Coupes détaillées des principales carrières de Grès à Voltzia	301
Table des matières	313

AVANT-PROPOS

Au terme de huit années de recherches, il m'est agréable de remercier ceux dont l'influence se retrouve à chaque page de ce mémoire, mes maîtres, mes aînés, mes amis.

M. le Doyen Georges MILLOT me proposa en 1960 un poste d'assistant de Paléontologie à l'Institut de Géologie qu'il dirige à Strasbourg. C'est là, après la préparation à l'agrégation des Sciences Naturelles, qu'il me fit rencontrer M. L. GRAUVOGEL. A la suite de cette entrevue, il me confia comme sujet de travail l'étude du Grès à Voltzia des Vosges. J'ai été profondément marqué par l'enseignement et la personnalité de ce maître de la Géologie. Auprès de lui, je fis l'apprentissage de mon métier d'enseignant, de chercheur et de gestionnaire au service des autres. Au long des années, il rectifia le cheminement de mes travaux par des critiques bienveillantes et une sollicitude inlassable. Il m'aida à compléter ma formation de naturaliste par des stages appropriés dans d'autres établissements scientifiques. L'équipe de chercheurs que M. Georges MILLOT a formée et maintenue autour de lui dans une atmosphère sereine, fut une source de dialogues constante avec des collègues compétents dans des domaines variés. Lors de la rédaction de ma thèse, il a consacré des journées précieuses à relire et corriger mon manuscrit, page après page, la plume à la main. Au cours de nos séances de travail, ce mémoire acquit son allure définitive. Qu'il veuille trouver ici l'expression de mon respect et de ma profonde gratitude.

Mile S. GILLET, Professeur de Paléontologie à l'Université de Strasbourg, m'a aimablement accueilli dans son laboratoire. Son enseignement et sa vaste érudition sur les faunes d'eaux saumâtres me furent fort profitables. Je lui en suis très reconnaissant.

M. L. GRAUVOGEL m'honore depuis dix ans de son amitié. Il m'a initié au travail de terrain et m'a ouvert les portes de ses admirables collections. C'est ainsi que j'ai eu le privilège d'étudier l'un des plus beaux ensembles faunistiques d'Europe. Un jeune homme ne pouvait être qu'enthousiasmé par une telle entreprise, surtout lorsque la personne du collectionneur se double de celle d'un naturaliste ayant la passion de la recherche, le goût de l'observation minutieuse et ce grain de fantaisie qui fait le charme du savant. M. L. GRAUVOGEL m'a communiqué la joie de découvrir. C'est en témoignage d'affectueuse reconnaissance que je lui dédie ce mémoire.

Mes vifs remerciements s'adressent aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail. M. L. DAVID a bien voulu m'associer au Centre de Paléontologie stratigraphique du C.N.R.S. qu'il dirige à Lyon et discuter les résultats de la partie paléontologique de ce mémoire. M. H. TINTANT m'a encouragé dans la poursuite de mon travail et m'a fait profiter de son vaste savoir dans le domaine de la paléontologie et de la paléoécologie. M. J. LUCAS m'a accordé son soutien efficace et amical et a généreusement mis à ma disposition les moyens importants du Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface du C.N.R.S. qu'il anime à Strasbourg.

Ma gratitude est grande envers M. A. LOMBARD qui m'a offert une hospitalité charmante dans son Institut de l'Université de Genève et qui a bien voulu relire la partie sédimentologique de mon étude. Elle l'est également envers M. J. PERRIAUX qui fut mon guide dans les Vosges gréseuses qu'il connaît parfaitement et qui m'a confié avec beaucoup de générosité ses nombreux documents de terrain.

A Strasbourg, au Laboratoire de Géologie et de Paléontologie et au Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface, l'amitié et l'aide des enseignants et des chercheurs me furent précieuses :

G. DUNOYER de SEGONZAC me prodigua ses conseils et accepta de corriger certains chapitres de mon manuscrit. Y. TARDY m'accorda de longues séances de travail pour discuter et mettre au point la partie géochimique de ce mémoire. M. RUHLAND, D. JEANNETTE et G. BRONNER m'initièrent à la mesure des paléocourants. L. STAMM-GRAUVOGEL me seconda avec gentillesse et efficacité dans la préparation de la microfaune. F. WEBER, P. LARQUÉ, A. MEILHAC et F. SCHUMACHER m'aidèrent dans l'étude pétrographique des grès. R. RAUSCHER m'a rendu grand service en se chargeant de certaines de mes tâches collectives. C. ADLOFF, G. ATAMAN, Y. BESNUS, J.G. BLANALT, M. BONHOMME, N. CLAUER, J. COGNÉ, J. DOU-BINGER, G. JEHL, A. MICHARD, H. PAQUET, L. SIMLER, J. et C. SITTLER, P. SCHWOERER, N. TRAUTH, P. WERNERT me facilitèrent le travail, chacun dans son domaine, par leurs conseils et leur serviabilité.

Au Laboratoire de Minéralogie et de Pétrographie, MM. S. GOLDSZTAUB, R. WEIL et A. SIAT m'ont obligeamment effectué les déterminations minéralogiques.

Durant la période qui suivit l'incendie de l'Institut de Géologie de Strasbourg en février 1967, M. G. OURISSON m'a aimablement hébergé dans son laboratoire à l'Institut de Chimie. Grâce à lui et à ses collaborateurs, P. ALBRECHT, R. BRANDT et H. KNOCHE prit corps et fut mené à bien un projet d'étude de la matière organique du Grès à Voltzia.

A tous j'exprime ma vive reconnaissance.

Je remercie également M. J. PIVETEAU, membre de l'Institut, qui a accepté de publier mes premiers résultats dans les Annales de Paléontologie, ainsi que J.P. von ELLER et L. PRÉVÔT pour le soin qu'ils ont apporté à mes publications dans le Bulletin du Service de la Carte géologique d'Alsace et de Lorraine.

Les multiples aspects de la géologie abordés au cours de mes recherches m'amenèrent à solliciter les conseils de nombreux spécialistes français et étrangers. Leurs critiques m'ont été profitables et m'ont permis d'être au courant des données les plus récentes. Je voudrais remercier plus particulièrement

les paléontologistes : P. BRÖNNIMANN, G. DEMATHIEU, J.C. FISCHER, R. FÖRSTER, F. GRAMANN, C. GUTH, W. HÄNTZSCHEL, D. HEYLER, E. JÖRG, L. KOEHN-ZANINETTI, H. KOZUR, W.G. KÜHNE, E. KUHN-SCHNYDER, J.P. LEHMAN, K.D. MEISCHNER, H. RIEBER, E.F. RIEK, S. SECRÉTAN, A. SEILACHER qui m'associa au groupe de travail "Fossil-Lagerstätten", H. et C. TERMIER, M. WARTH, R. WILD:

les biologistes : J. BOUILLON, C. DELAMARE-DEBOUTTEVILLE, L. CHOPARD, A. FRANC, F. GOUIN, G. HARTMANN-SCHRÖDER, P. JOLY, L. LAUBIER, C. LÉVI, T. MONOD, H.L. SANDERS, J.P. TRILLES, M. VACHON;

les géologues du Trias dont l'expérience du terrain m'a enrichi : E. BACKHAUS, E. BECKSMANN, R. BUFFARD, R. BUSNARDO, L. COUREL, M. DURAND, J.M. DUTUIT, B.F. KLINKHAMMER, G. JURAIN, E.M. MÜLLER, D. ORTLAM, G. RICHTER-BERNBURG, F. RÖSING, W.A. SCHNITZER;

les sédimentologistes : Mme C. DUBOUL-RAZAVET qui me guida dans le delta du Rhône ; C.O. DURHAM, J.C. FERM, C.H. MOORE, J.P. MORGAN, B.F. PERKINS et H.B. STENZEL qui m'accueillirent à l'Université de Baton Rouge (Louisiane) et me firent connaître le delta du Mississippi ; H.E. REINECK et G. HERTWECK qui me conduisirent dans le Watt de la mer du Nord ; J. CHAROLLAIS, J.P. VERNET et F. WELLHÄUSER qui furent mes guides dans la molasse suisse ; J.M. OBELLIANNE et T.R. WALKER qui m'accompagnèrent sur le terrain ;

R. SCHILLING, Directeur de l'Institut de Latin de l'Université de Strasbourg, qui me conseilla dans la création de dénominations spécifiques et génériques nouvelles ;

et tous ceux que j'ai involontairement omis de nommer.

Les nombreuses tâches matérielles qu'entraîne la réalisation d'un tel ouvrage prennent beaucoup de temps. J'en fus en grande partie déchargé grâce au dévouement du personnel technique qui m'entourait. Mlle M. WOLF mena à bien avec beaucoup de gentillesse et de compétence le travail de dactylographie et la présentation définitive du manuscrit. Elle fut remarquablement secondée par Mme F. POILLERAT. Mlle M.O. BONGRAND et Mmes H. SCHNEEGANS et R. ORY me facilitèrent l'important travail de bibliographie que suppose une thèse de Paléontologie, grâce à la gestion du magnifique outil de travail que constitue notre bibliothèque. Les plaques minces ont été réalisées par J.M. HAMEL et I. BALOUKA et les dessins par J. GRUNER et Mme M. GASSER avec un grand souci de perfection. La mise en forme de ce mémoire doit beaucoup à Mlle F. FRUHINSHOLZ, J. HUGEL, J.P. FREYERMUTH, F. OPPERMANN, J.P. SCHUSTER et G. ZINK. Envers tous, j'ai une grande dette de reconnaissance.

J'associe dans mes remerciements les propriétaires des carrières et leur personnel, toujours bienveillants, qui furent, à maintes reprises, à l'origine de découvertes intéressantes : MM. BRUA, DUMAZERT, HISSUNG, KLEIN, MARTIN, MAURER, MERTZ, METZGER, PHILLIPS, RAUSCHER, SCHNEIDER, ZIMMERMANN.

Qu'il me soit permis enfin de remercier ceux qui n'ont pas directement été associés à l'élaboration de ce travail, ceux qui m'ont successivement préparé puis encouragé à le mener à son terme, mes parents, mes maîtres de l'Ecole Normale d'Instituteurs, mes professeurs de l'Université de Strasbourg, ma femme.

INTRODUCTION

La couverture gréseuse des Vosges date du Permien et du Trias inférieur. Alors que les grès permiens restent localisés dans les dépressions de la surface posthercynienne, les grès triasiques s'étendent largement sur le socle vosgien. Actuellement, ils affleurent de part et d'autre de l'axe de la chaîne. Ils occupent de grandes étendues sur sa bordure occidentale, tandis que du côté rhénan ils n'apparaissent que dans quelques champs de fracture où ils furent préservés de l'érosion. Mais leur extension et leur puissance sont maximum dans le Nord de l'Alsace et de la Lorraine, en Sarre et dans le Palatinat, où leur épaisseur peut dépasser 400 mètres.

Dans son étude sur les Vosges gréseuses, PERRIAUX (1961) établit une échelle stratigraphique détaillée du Trias inférieur de faciès germanique ou Buntsandstein (Tableau II). Le Grès à Voltzia correspond au terme supérieur de cette série détritique. Il fait partie des Grès bigarrés des auteurs anciens (ÉLIE de BEAUMONT, 1828) et du sous-étage Vaslénien de DUBOIS(1948).

LES ÉTUDES PALÉONTOLOGIQUES

Situé à la limite entre les formations continentales du Buntsandstein et les dépôts marins du Muschelkalk, le Grès à Voltzia s'est révélé particulièrement riche en organismes fossiles.

Les premières observations paléontologiques remontent au début du siècle dernier. Elles sont dues à A. MOUGEOT, médecin à Bruyères (Vosges) et surtout à P.L. VOLTZ, ingénieur au Corps royal des mines et chef de l'Arrondissement minéralogique de Strasbourg. Les végétaux fossiles que VOLTZ récolta dans les grès des Vosges furent étudiés par BRONGNIART (1828). Celui-ci dédia au géologue strasbourgeois le genre Voltzia, gymnosperme particulièrement commune dans cette formation. A la suite d'une note de WEISS (1864), l'appellation Grès à Voltzia devait progressivement s'imposer pour désigner la partie supérieure du Buntsandstein de la rive gauche du Rhin.

En 1836, VOLTZ fit paraître la première grande étude paléontologique consacrée au Grès à Voltzia. L'auteur y localise avec précision les fossiles animaux et végétaux de la carrière de Soultz-les-Bains (Bas-Rhin). Ce travail fut le point de départ d'une série de publications sur des niveaux semblables de la Haute-Saône, des Vosges, de la Sarre et du Palatinat. Leur succession chronologique est donnée dans les mémoires de MAUBEUGE (1959) et de PERRIAUX (1961). Parmi ces travaux, les suivants concernent plus particulièrement le Nord des Vosges :

von MEYER (1836), DEECKE (1889), CORROY (1928), FIRTION (1934) et GRAUVOGEL (1947 c) décrivent les Vertébrés du Grès à Voltzia ;

les Arthropodes sont étudiés par von MEYER (1834, 1840), SCHIMPER (1853), BILL (1914), GRAUVOGEL (1947 c), GRAUVOGEL et LAURENTIAUX (1952) ;

les Mollusques et les Brachiopodes font l'objet d'inventaires détaillés de la part de HOGARD (1837), BENECKE (1877), BLEICHER (1887), SCHUMACHER (1890), FIRTION (1936), MAUBEUGE (1959) et PERRIAUX (1961) ;

la flore est décrite par BRONGNIART (1828), SCHIMPER et MOUGEOT (1844), FLICHE (1905-1910), FIRTION (1936) et GRAUVOGEL (1947 b) ;

l'ouvrage de SCHMIDT (1928), complété en 1938, reprend la plupart de ces descriptions dans un panorama paléobiologique du Trias germanique.

LES ESQUISSES PALÉOGÉOGRAPHIQUES

Tandis que progressait la connaissance de la faune et de la flore du Trias inférieur, diverses reconstitutions paléogéographiques en furent proposées. Sauf exception, le paysage correspondant au Grès à Voltzia ne fut guère distingué de celui du Buntsandstein en général. En suivant l'évolution des idées sur l'environnement correspondant aux grès du Trias inférieur, on est amené à reconnaître trois époques successives (WURSTER, 1964).

Pour les auteurs du 19ème siècle, le Buntsandstein est une formation marine (ÉLIE de BEAUMONT, 1828; von ALBERTI, 1834, 1864; VOLTZ, 1836; DAUBRÉE, 1852; BENECKE, 1877; LIÉTARD, 1888). Une granulométrie défavorable à la fossilisation est rendue responsable de la rareté relative des organismes.

Vers la fin du siècle, sous l'influence des géologues et des géographes allemands, les grès rouges du Trias inférieur sont généralement considérés comme un dépôt continental plus ou moins désertique (BORNEMANN, 1889 ; FRAAS, 1899 ; WALTHER, 1900). La rare faune qui s'y rencontre correspondrait à des populations de cours d'eau temporaires ou de chotts (FRENTZEN, 1931). Malgré certaines réticences (PHILIPPI, 1901 ; TORNQUIST, 1912), l'image du "désert" du Buntsandstein allait survivre longtemps dans les manuels classiques (GIGNOUX, 1936).

Les critiques vinrent essentiellement des géologues américains (in MILLOT, PERRIAUX et LUCAS, 1961). Ils montrèrent que la couleur rouge n'était pas liée aux déserts. Peu à peu naquit l'idée d'un paysage plat, constamment situé au niveau de la mer, où les influences continentales et marines s'affrontaient (BRINKMANN, 1926; STAESCHE, 1927; STRIGEL, 1929). La part respective qui, dans la sédimentation, revenait au continent ou à la mer variait suivant les régions et les niveaux stratigraphiques envisagés^{*}. Leur appréciation devait diviser pour longtemps les opinions.

Malgré son riche contenu paléontologique, le Grès à Voltzia de l'Est de la France ne fut pas à l'abri de telles controverses. Si le caractère marin du sommet du Grès à Voltzia (Grès argileux) fut souvent reconnu, l'interprétation paléogéographique du Grès à Voltzia inférieur (Grès à meules) est encore discutée. GRAUVOGEL (1947 a), PIVETEAU (1951), THÉOBALD (1951) et PERRIAUX (1961) admettent un paysage continental soumis à des incursions marines fugaces. Pour FORCHE (1935), MAUBEUGE (1959) et RICOUR (1962), il s'agit d'une région franchement littorale. Le problème restait donc ouvert. On a pensé que l'étude simultanée de la paléontologie, de la sédimentologie et de la géochimie de cette formation pouvait permettre de préciser l'environnement paléogéographique et son évolution au cours du temps. C'est le but du présent mémoire.

OBJET ET PLAN DE CE MÉMOIRE

Dans ce travail, je me suis volontairement limité à l'étude du Grès à Voltzia d'une partie du Nord des Vosges. L'aire étudiée correspond approximativement à un quadrilatère dont les quatre sommets sont jalonnés par les villes de Molsheim, Sarrebourg, Forbach et Bitche (Fig. 1). Elle couvre donc partiellement la région naturelle de la Haardt. Deux considérations guidèrent ce choix.

De cette partie des Vosges provient l'essentiel de notre documentation paléontologique sur le Grès à Voltzia. En particulier, trente années de recherches patientes et minutieuses ont permis à L. GRAUVOGEL de réunir une magnifique collection sur la faune et la flore du Buntsandstein supérieur. Ce matériel, resté en grande partie inédit, fut le point de départ de mon travail. Depuis 1961 j'en ai entrepris l'étude paléontologique. En collaboration avec L. GRAUVOGEL, j'ai poursuivi l'exploitation systématique des gisements fossilifères du Grès à Voltzia. Nous avons ainsi pu compléter considérablement ces collections. D'autre part, dans cette région, les grès sont encore activement exploités, tandis que les carrières abandonnées sont nombreuses et fournissent des affleurements facilement accessibles. C'est un lieu privilégié pour les observations sédimentologiques.

^(*) Une importante bibliographie est donnée sur ce sujet par WURSTER (1964).

Pendant des années je me suis heurté aux difficultés que soulève la reconstitution de paysages non familiers à un paléontologue et à un Européen. C'est alors que j'ai eu la chance d'effectuer deux stages dans des environnements deltaïques actuels : le delta du Mississippi et le delta du Rhône. Un séjour à l'Institut de Recherche sur la Géologie et la Biologie marines de Wilhelmshaven, sur les rives de la Mer du Nord, me permit de compléter mes connaissances sur les mécanismes de la sédimentation actuelle. Grâce à ces stages, je fus initié à l'étude des faciès et des caractères sédimentologiques de ces paysages vastes et changeants, mais aussi au vocabulaire et à la bibliographie propres à ce genre de recherches.

Les résultats présentés ici ne concernent que la région étudiée. Mais il est vraisemblable que nombre d'entre eux restent valables pour le Buntsanstein en général.

Le cheminement de mes recherches a dicté les grandes subdivisions de ce mémoire. Une première partie est consacrée à l'étude de la faune et de la flore du Grès à Voltzia. Jusqu'à présent, une étude d'ensemble de la paléontologie de cette formation n'avait pas été entreprise. Ce sera l'occasion de présenter un livre d'images de la vie au Buntsandstein supérieur, c'est-àdire voici 200 millions d'années.

Dans une deuxième partie, je replacerai les organismes dans leur environnement physicochimique. Les caractères paléoécologiques, sédimentologiques et géochimiques des faciès permettront de reconstituer différents milieux de dépôt et de proposer un schéma paléogéographique du Buntsandstein supérieur.

La dernière partie de ce mémoire donnera une vue d'ensemble sur la succession des faunes et des paysages, sur le climat et sur la place du Grès à Voltzia dans le Trias de type germanique.

Je souhaite apporter ainsi ma contribution à différents aspects de la Géologie dynamique. Les principaux sont les suivants :

la description d'un tableau paléobiologique du Buntsandstein supérieur ;

la reconstitution de milieux de dépôt situés à la frontière entre les domaines marins et continentaux ;

la datation précise de la transgression du Muschelkalk dans le Nord des Vosges ;

l'analyse d'un mode d'ensevelissement des reliefs hercyniens par les nappes gréseuses du Trias.



Figure 1 - (Les numéros correspondent aux carrières décrites dans les Annexes I et II)

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE PALÉONTOLOGIQUE DU GRÈS À VOLTZIA

INTRODUCTION

L'admirable collection qu'a réunie L. GRAUVOGEL sur la faune et la flore du Grès à Voltzia fut le point de départ de cette étude paléontologique. C'est en collaboration avec cet auteur que fut entreprise l'exploitation de la plupart des gisements fossilifères. Afin de regrouper, en un lieu unique, un matériel qui provient d'un même site géologique, mes propres collections n'ont généralement pas été distinguées de celles de L. GRAUVOGEL. Elles sont provisoirement entreposées à l'adresse suivante : 4, place du Marché-aux-Poissons, Strasbourg - 67.

D'autres collections, conservées à l'Institut de Géologie de l'Université de Strasbourg, ont été étudiées dans le cadre de ce travail. Elles furent malheureusement en partie détruites par un incendie au mois de février 1967. Il s'agit des collections suivantes :

- collection W.P. SCHIMPER et A. MOUGEOT : flore et quelques éléments de la faune du Grès à Voltzia ;
- collection H. von MEYER : Vertébrés du Grès à Voltzia ;
- collection P.L. VOLTZ : quelques végétaux du Grès à Voltzia ;
- collection E. SCHUMACHER : Mollusques du Grès à Voltzia et du Grès coquillier ;
- collection P. KESSLER : Crustacés du Grès à Voltzia ;
- collection P.C. BILL : faune du Grès à Voltzia (essentiellement Arthropodes et Mollusques);
- collection F. FIRTION : quelques éléments de la faune et de la flore du Grès à Voltzia.

D'autre part, plusieurs autres collections paléontologiques purent être consultées :

- à l'Institut de Géologie de Nancy : collections M. DURAND et G. JURAIN (faune du Grès à Voltzia des Vosges méridionales) ;
- à Karlsruhe : collection E. JÖRG (Crustacés et Poissons du Buntsandstein supérieur) des "Landessammlungen für Naturkunde" ;
- à Tübingen : collection du Muschelkalk de l'Institut de Géologie et de Paléontologie ;
- à Freiburg im Breisgau : collection du Buntsandstein et du Muschelkalk de l'Institut de Géologie.

MÉTHODES D'ÉTUDE ET DE CONSERVATION DES FOSSILES

La majorité des fossiles du Grès à Voltzia provient de niveaux argileux finement lités. Les organismes animaux et végétaux se rencontrent alors à l'état d'empreintes pelliculaires entre les feuillets du sédiment. La chitine des Crustacés et le squelette des Vertébrés sont généralement épigénisés en apatite. Les végétaux sont colorés par des oxydes de fer. Lors de l'exploitation des gisements, empreintes et contre-empreintes des fossiles ont été récoltées et distinguées par un signe (M - mur; T - toit). Les données des deux empreintes sont en effet complémentaires pour la reconstitution des organismes. Le délitage du sédiment est grandement facilité par l'action du gel. Celle-ci s'obtient en exposant la roche aux froids de l'hiver, sous une faible couche de terre. Plus rapidement, on parvient au même résultat à l'aide d'un congélateur dont la température est maintenue durant quelques jours à environ - 25°. Ce dernier procédé nécessite l'emballage de la roche, dès son extraction du gisement, dans un sac en plastique imperméable, afin d'éviter sa dessication. Le sédiment peut ensuite être ouvert feuillet par feuillet à l'aide d'une lame bien affûtée.

2

Les restes organiques du Grès à Voltzia sont très fragiles. Ils doivent être fixés rapidement, tant que la roche reste humide. L'utilisation de la gomme arabique fortement diluée s'est révélée très efficace. Au départ, elle est appliquée par touches successives, à l'aide d'un fin pinceau, aux abords immédiats du fossile. L'imprégnation de la matière organique peut se faire ainsi progressivement. Ensuite, la gomme arabique est étendue sur tout l'échantillon. Lorsque celui-ci est déjà sec, il vaut mieux utiliser la gomme-laque dissoute dans l'alcool. Ce produit disperse en effet moins les particules de matière organique. La roche sèche et traitée par l'un de ces procédés est finalement recouverte par un mince film de vernis à l'acétone qui la protégera de l'humidité et des poussières. Cette technique de conservation a été mise au point au long des années par L. GRAUVOGEL.

L'étude des échantillons a été effectuée par les méthodes classiques : observation à la loupe binoculaire, dessins à la chambre claire et étude sur agrandissements photographiques. Dans de nombreux cas, la confection de plaques minces et le tamisage du sédiment furent utilisés avec succès. Enfin, certains échantillons ont pu être étudiés au microscope électronique à balayage de la Faculté des Sciences de Lyon.

PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE PALÉONTOLOGIQUE

La plupart des organismes du Grès à Voltzia ici décrits ont déjà fait l'objet de publications détaillées au fur et à mesure de leur étude poursuivie au long des années (GALL et FISCHER, 1965 ; GALL et GRAUVOGEL, 1964, 1966, 1967, 1968, 1971 ; GRAUVOGEL et GALL, 1962 ; KOEHN-ZANINETTI, BRÖNNIMANN et GALL, 1969). Dans ce mémoire, les descriptions des genres et des espèces seront présentées d'une manière plus succincte. Les groupes dont l'étude n'est pas achevée (les Insectes par exemple) seront maintenus en nomenclature ouverte. Pour chaque forme décrite, seules seront citées les références bibliographiques considérées comme fondamentales pour son interprétation et celles qui fournissent une liste détaillée des synonymies. Les affinités systématiques, la répartition géographique et stratigraphique et les renseignements sur l'écologie sont tirés de la littérature géologique.

On distinguera les gisements du Grès à Voltzia inférieur (Grès à meules) de ceux du Grès à Voltzia supérieur (Grès arileux). Lorsque plusieurs affleurements sont situés sur le territoire d'une même commune, leur localisation précise est donnée par un numéro explicité sur la Figure 1 et dans l'Annexe I.

La classification paléontologique adoptée ici est celle des traités classiques : le Treatise on Invertebrate Paleontology, publié sous la direction de R.C. MOORE, et le Traité de Paléontologie publié sous la direction de J. PIVETEAU.

CHAPITRE 1 LA FAUNE DU GRÈS À VOLTZIA

EMBRANCHEMENT DES RHIZOFLAGELLÉS

CLASSE DES RHIZOPODES

Ordre des FORAMINIFÈRES *

Sous-ordre des Textulariina DELAGE et HÉROUARD, 1896 Famille des Ammodiscidae REUSS, 1862 Genre Glomospirella PLUMMER, 1945

Glomospirella oscillens Koehn-Zaninetti, Brönnimann et Gall, 1969 Pl. I, fig. 1-2

1969 - Glomospirella oscillens KOEHN-Z., BRÖNN. et GALL, p. 122 ; pl. II, fig. 1-8. <u>Matériel</u> - Collection Gall : holotype (lame X2), paratypes (lames D 1xc, D 1b, D 2a, Va, Vc, X4)

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Phalsbourg, Vilsberg Grès argileux : Petersbach (9 ; locus typicus)

<u>Description</u> - Test en forme de disque épais à faces inférieures et supérieures planes. Loge tubulaire non divisée. Stade initial à enroulement irrégulier passant à 4 tours périphériques dont deux sont oscillants et les deux externes planispiralés. Paroi calcaire, imperforée, de texture microgranulaire ou finement agglutinée.

Dimensions moyennes : diamètre du test 260 μ , diamètre de la pelote centrale 80 μ , hauteur du test 80 μ , largeur de la loge au dernier tour 80 μ , hauteur de la loge au dernier tour 25 μ , épaisseur de la paroi 5 μ

<u>Affinités</u> - Glomospirella oscillens présente davantage d'affinités avec des formes paléozoiques (comme G. pseudopulchra LIPINA du Carbonifère inférieur) qu'avec des espèces triasiques. Elle est identique à Glomospirella sp. figurée par PREMOLI SILVA (1964, pl. LI, fig. 4) dans le Werfénien des Alpes Juliennes occidentales.

(*) En raison des difficultés d'extraction, tous les Foraminifères ont été déterminés en plaques minces.

Glomospirella aff. spirillinoides (GROZDILOVA et GLEBOVSKAIA, 1948 Pl. I, fig. 3 et 9

1948 - Glomospira spirillinoides GROZ. et GLEBOV., p. 147 ; pl. I, fig. 2-4.

1964 - Glomospirella spirillinoides (GROZ. et GLEBOV.) - Conil et Lys, p. 65; pl. VIII, fig. 145-150.

1969 - Glomospirella aff. spirillinoides (GROZ. et GLEBOV.) - Koehn-Zaninetti, Brönnimann et Gall, p. 124 ; pl. III, fig. 1-9 ; pl. II, fig. 9-10 (?)

Matériel - Collection Gall : lames Ad1, D1a, D1c, D1xc, D2b, D2c, Va, X3

Gisements - Grès à meules : Phalsbourg, Vilsberg

Grès argileux : Adamswiller (8), Petersbach (9)

Description - Test en forme de disque biconcave. Loge tubulaire non divisée s'élargissant rapidement. Stade initial irrégulier réduit auquel succède une spire plane de 4 à 5 tours.

Dimensions moyennes : diamètre du test 350 μ , diamètre de la pelote centrale 50 μ , hauteur maximum du test 100 μ , largeur de la loge au dernier tour y compris la paroi 100 μ , hauteur de la loge dans les mêmes conditions 45 μ , épaisseur de la paroi 10 μ

<u>Affinités</u> - Les formes du Grès à Voltzia ne diffèrent des espèces du Carbonifère que par une épaisseur plus faible de la paroi. Ce caractère dépend sans doute de l'état de recristallisation des tests.

Ecologie - D'après sa distribution stratigraphique, G. spirillinoides est un organisme marin.

 $\frac{Répartition stratigraphique et géographique}{supérieur d'Autriche orientale.} - Carbonifère inférieur de Belgique et de Russie. Trias$

Genre Glomospira RZEHAK, 1885

Glomospira sp.

Pl. I, fig. 5 et 6

1969 - Glomospira sp. - KOEHN-ZANINETTI, BRÖNNIMANN et GALL, p. 125; pl. I, fig. 11, 13-15.

Matériel - Collection Gall : lames D1c, Vc, Vd

Gisements - Grès à meules : Phalsbourg, Vilsberg

<u>Description</u> - Test formé par un tube non divisé, enroulé en pelote suivant un mode très irrégulier. Aucune section n'a permis une identification spécifique. Diamètres maximum des sections obliques 100 à 200 μ

Ecologie - Les Glomospires sont des formes d'eaux marines ou saumâtres

 $\frac{R\acute{e}partition\ stratigraphique\ et\ g\acute{e}ographique\ -\ Glomospira\ est\ un\ genre\ cosmopolite,\ encore\ actuel,\ connu\ depuis\ l'ère\ primaire$

Sous-ordre des Miliolina Delage et Hérouard, 1896 Famille des Fischerinidae Millett, 1898 Genre Agathammina NEUMAYR, 1887

Agathammina aff. austroalpina KRISTAN-TOLLMANN et TOLLMANN, 1964 Pl. I, fig. 4

- 1964 Agathammina austroalpina KR. TOLLMANN et TOL., p. 550 ; pl. 2, fig. 6-17 et pl. 5, fig. 8-9
- 1969 Agathammina austroalpina KR. TOLLMANN et TOL. Koehn-Zaninetti, p. 57; texte-fig. 11 et pl. VIII, fig. A-D.
- 1969 Agathammina ? austroalpina KR. TOLLMANN et TOL. Koehn-Zaninetti, Brönnimann et Gall, p. 126 ; pl. I, fig. 6, 9 et 10.

Matériel - Collection Gall : lames D 1Xc, D 2a

Gisements - Grès à meules : Phalsbourg, Vilsberg

 $\frac{Description}{sée, enroulée suivant le mode quinqueloculin. Paroi calcaire imperforée$

Dimensions moyennes du test : hauteur 300 μ , épaisseur 80 μ

 $\frac{\text{Affinités}}{\text{A}}$ - La paroi des formes du Grès à Voltzia étant recristallisée, la détermination de A. austroalpina est retenue avec réserve.

Ecologie - D'après sa distribution stratigraphique, A. austroalpina est une forme marine.

 $\frac{Répartition stratigraphique et géographique}{Carpates.}$ - Anisien supérieur jusqu'au Rhétien des Alpes et des Carpates.

Sous-ordre des Rotaliina DELAGE et HÉROUARD, 1896

Famille des Lagenidae SCHULZE, 1877

Pl. I, fig. 7 et 8

1969 - Lagénidés - Koehn-Zaninetti, Brönnimann et Gall, p. 127 ; pl. I, fig. 1-8.

Matériel - Collection Gall : lames D lb, D lxc, Va, Vd, X2

Gisements - Grès à meules : Phalsbourg, Vilsberg

Grès argileux : Petersbach (9)

Description - Test rectiligne ou arqué formé de nombreuses loges. Paroi calcaire finement perforée. Les sections observées ne permettent pas une détermination des genres.

Ecologie - Les Lagénidés sont des organismes marins (BANDY, 1960).

Répartition stratigraphique et géographique - Les Lagénidés sont des Foraminifères cosmopolites connus depuis l'ère primaire.

EMBRANCHEMENT DES COELENTÉRÉS SOUS-EMBRANCHEMENT DES CNIDAIRES

CLASSE DES HYDROZOAIRES

Ordre des LIMNOMEDUSAE KRAMP, 1938 Famille des Olindiadidae HAECKEL, 1879 Genre Progonionemus GRAUVOGEL et GALL, 1962

Progonionemus vogesiacus GRAUVOGEL et GALL, 1962 Texte-fig. 2 et 3 ; pl. II, fig. 1 et 2

1951 a - Trachymedusae - Grauvogel, p. 139

1962 - Progonionemus vogesiacus GRAUVOGEL et GALL, p. 17; texte-fig. 1-5; pl. I, fig. a.

Matériel - Collection Grauvogel : holotype (MED 1), 8 paratypes (MED 2 à MED 9)

Gisements - Grès à meules : Arzviller (27), Bust (17), Vilsberg (locus typicus)

<u>Description</u> - Ombrelle en forme de cloche régulière. Bulbes marginaux. Tentacules nombreux et grêles de deux types, longs et courts. Tentacules longs d'aspect rigide ; leur segment distal porte des organes d'adhésion. Nématocystes groupés en anneaux. Manubrium cylindrique. Quatre gonades enroulées en spirale autour des canaux radiaires. Poches gastriques (?).

Dimensions : diamètre de l'ombrelle 8 à 40 mm ; longueur des tentacules 9 à 40 mm ; largeur moyenne des tentacules 0,6 mm

<u>Affinités</u> - L'organisation générale et l'existence d'organes adhésifs sont conformes aux caractères des Olindiadidae et, en particulier, du genre Gonionemus. Les méduses fossiles connues à l'heure actuelle ne sont conservées qu'à l'état de moules externes ou de moules de cavités gastriques ; elles offrent peu d'éléments de comparaison avec les empreintes du Grès à Voltzia où les corps sont fossilisés dans leur intégralité.

Ecologie - Il est intéressant de noter que parmi les Limnoméduses actuelles se rencontrent beaucoup de formes d'eau douce ou d'eau saumâtre.

EMBRANCHEMENT DES BRACHIOPODES

CLASSE DES INARTICULATA HUXLEY, 1869

Ordre des LINGULIDA WAAGEN, 1885

Famille des Lingulidae MENKE, 1828

Genre Lingula BRUGUIÈRE, 1797

Lingula tenuissima BRONN, 1851

Pl. V, fig. 1

1864 - Lingula tenuissima BRONN - Alberti, p. 160 ; pl. VI, fig. 3. 1968 - Lingula tenuissima BRONN - Broglio Loriga, p. 189 ; pl. I et II.



Figure 2 - Jeune exemplaire de Progonionemus vogesiacus GRAUV et GALL (nº MED 3) Grès à meules. Vilsberg. (d'après GRAUVOGEL et GALL, 1962)



Figure 3 - Exemplaire sexué de Progonionemus vogesiacus GRAUV. et GALL (nº MED 7) Grès à meules. Vilsberg. (d'après GRAUVOGEL et GALL, 1962)

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une centaine d'échantillons

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Bust (16, 17), Cocheren, Hangviller (21), Marmoutier, Petersbach (9), Phalsbourg, Schoenbourg, Vilsberg, Waldhambach (5) - Grès argileux : Arzviller (7), Bust (16), Hangviller (21), Soultz-les-Bains, Vilsberg

Description - Coquille ovale et allongée, légèrement plus large dans la région antérieure. Bord pédonculaire pointu ; côté antérieur un peu tronqué. Stries d'accroissement nombreuses et concentriques. Sur les moules internes des valves brachiales apparaît un sillon longitudinal localisé près du crochet.

Dimensions : la longueur des valves varie de 10 à 15 mm, le rapport largeur/longueur de 0,50 à 0,60 $\,$

Remarque - Par suite de la nature phosphatée du test, les coquilles de lingules sont généralement transformées en apatite de teinte brune ou blanchâtre.

Ecologie - Depuis l'ère primaire, les lingules ont peuplé le même milieu. Elles vivent enfouies dans les fonds meubles de la zone de balancement des marées (CRAIG, 1952 ; PAINE, 1970). Elles peuvent y supporter des variations appréciables de l'oxygénation et de la salinité des eaux.

Répartition stratigraphique et géographique - L. tenuissima est connu dans le Trias de faciès germanique depuis le Buntsandstein supérieur jusqu'au Keuper et, dans les Alpes, au Werfénien, à l'Anisien et au Carnien (DIENER, 1920).

EMBRANCHEMENT DES ANNÉLIDES

CLASSE DES POLYCHÈTES Ordre des ERRANTS Famille des Leodicidae TREADWELL, 1921 Genre Eunicites Ehlers, 1868

Eunicites triasicus GALL et GRAUVOGEL, 1967 Texte-fig. 4 ; pl. III. fig. 2

1967 b - Eunicites triasicus GALL et GRAUVOGEL, p. 107 ; texte - fig.2 ; pl. B, fig. 1-2.

 $\underline{Matériel}$ - Collection Grauvogel : holotype (AN 1), paratype (AN 2)

Gisements - Grès à meules : Arzviller (27, locus typicus).

Description - Corps grêle formé de plus de 150 segments. Saillies des parapodes apparentes. Machoire supérieure comprenant deux forceps carénés et lisses, deux maxilles aux bords denticulés et trois plaques dentaires

Dimensions : longueur du corps supérieure à 35 mm ; largeur environ 1 mm.

<u>Affinités</u> - E. triasicus rappelle les Eunicidés actuels. Les différences de conservation rendent difficile tout rapprochement avec les espèces décrites par EHLERS (1868) dans le Jurassique de Solnhofen.

Ecologie - Il faut signaler que les Eunicidés actuels sont particulièrement tolérants vis-à-vis des variations de la salinité (WESENBERG-LUND, 1958).



Figure 4 - Reconstitution de l'appareil masticateur d'Eunicites triasicus GALL et GRAUV. (n° AN1 ; x 08) Grès à meules. Arzviller. (d'après GALL et GRAUVOGEL, 1967 b)



Figure 5 - Région antérieure du corps de Homaphrodite speciosa GALL et GRAUV. (n° AN 6 b ; x 35) Grès à meules. Arzviller. (d'après GALL et GRAUVOGEL, 1967 b).

Famille des Aphroditidae SAVIGNY, 1820 Genre Homaphrodite Gall et GRAUVOGEL, 1967

Homaphrodite speciosa GALL et GRAUVOGEL, 1967 Texte-fig. 5 ; pl. III, fig. 1

1967 b - Homaphrodite speciosa GALL et GRAUVOGEL, p. 105; texte-fig. 1; pl. A, fig. 1-2. Matériel - Collection Grauvogel : holotype (AN 3), 8 paratypes (AN 4 à AN 8)

Gisement - Grès à meules : Arzviller (27, locus typicus)

Description - Corps ovale, peu allongé, formé d'environ 35 segments. Acicules des parapodes bien conservés et disposés par paires. Deux mâchoires simples. Deux antennes (?)

Dimensions moyennes du corps : longueur 10 mm, largeur 1,5 mm

 $\frac{\text{Affinités}}{\text{Polynoinae}}$ - L'organisation générale de H. speciosa rappelle celle de la sous-famille des Polynoinae (FAUVEL, 1959).

Ecologie - Il faut noter que les Polynoinae actuels, essentiellement marins, renferment également des espèces d'eaux saumâtres (WESENBERG-LUND, 1958).

Ordre des SÉDENTAIRES Famille des Serpulidae BURMEISTER, 1837 Genre Spirorbis DAUDIN, 1800

Spirorbis cf. pusillus (MARTIN), 1809 Pl. IV, fig. 1

1880 - Spirorbis pusillus (MARTIN) - Etheridge, p. 113; pl. VII, fig. 1-7
1904 - Spirorbis pusillus (MARTIN) - Malaquin, p. 63; pl. II, fig. 1, 3-4
1956 - Spirorbis pusillus (MARTIN) - Van der Heide, p. 100; 3 pl., fig. 1-15
1967b-Spirorbis cf. pusillus (MARTIN) - Gall et Grauvogel, p. 108; pl. C, fig. 1

<u>Matériel</u> - Collection Grauvogel : nombreux exemplaires sur différents supports (AN 9 à AN 12) Gisement - Grès à meules : Arzviller (27)

<u>Description</u> - Coquille en forme de tube enroulé en spirale plane. Deux tours de spire. Elle est fixée sur des substrats divers : végétaux, valves de lamellibranches, pontes de poissons.

Dimensions : diamètre inférieur à 1,5 mm

<u>Affinités</u> - En raison de la mauvaise conservation des formes du Grès à Voltzia, la détermination spécifique est donnée avec réserve. Une espèce voisine, S. valvata BERGER, est commune dans le Muschelkalk.

Ecologie - Le genre Spirorbis se rencontre à la fois dans des dépôts d'eaux douces, saumâtres ou marins (ROGER, 1952).

Répartition stratigraphique et géographique - S. pusillus est une espèce cosmopolite du Carbonifère.

ANNÉLIDES INCERTAE SEDIS

Genre Triadonereis MAYER, 1954

Triadonereis sp.

Pl. IV, fig. 2

1967 b - Triadonereis sp. Gall et Grauvogel, p. 108; pl. C, fig. 2.
<u>Matériel</u> - Collection Grauvogel : 6 échantillons (AN 13 à 19).
<u>Gisement</u> - Grès à meules : Arzviller (27).
<u>Description</u> - Corps grêle et vermiforme, à nombreuses constrictions. Tête inconnue.
Dimensions du corps : longueur supérieure à 15 mm, largeur environ 0,5 mm
<u>Affinités</u> - La conservation des formes du Grès à Voltzia étant incomplète, leur attribution au genre Triadonereis est provisoire.
<u>Ecologie</u> - Triadonereis sp. avait des moeurs saprophages (GALL et GRAUVOGEL, 1967 b).
<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - Triadonereis a été décrit du Muschelkalk supérieur d'Allemagne (MAYER, 1954).

EMBRANCHEMENT DES MOLLUSQUES

CLASSE DES LAMELLIBRANCHES SOUS-CLASSE DES PTERIOMORPHIA BEURLEN, 1944 Ordre des MYTILOIDA FÉRUSSAC, 1822 Famille des Mytilidae RAFINESQUE, 1815 Genre Modiolus LAMARCK, 1799

Modiolus sp. pl. V, fig. 2

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une dizaine d'exemplaires.

Gisements - Grès argileux : Adamswiller (8), Arzviller (27)

Description - Coquille équivalve, étroite et très allongée. Crochet situé au contact du bord antérieur. Une carène issue du crochet et se prolongeant parallèlement au grand axe de la coquille confère à celle-ci une section triangulaire.

Dimensions : longueur moyenne de la coquille 2,5 cm, largeur 1 cm

<u>Affinités</u> - Cette forme rappelle M. triquetra v. SEEBACH par le contour de la coquille, mais en diffère par un allongement plus accentué. Ordre des PTERIOIDA NEWELL, 1965 Famille des Bakevelliidae KING, 1850 Genre Hoernesia LAUBE, 1866

> Hoernesia sp. Pl. V, fig.8

<u>Matériel</u> - Collections Grauvogel et Gall : 2 exemplaires <u>Gisements</u> - Grès à meules ; Bust (16) Grès argileux : Arzviller (27)

<u>Description</u> - Coquille inéquivalve, allongée, tordue. Crochet proéminent situé près du bord antérieur. Ligne cardinale rectiligne.

Dimensions : longueur de la coquille 2 à 3 cm

<u>Affinités</u> - Les exemplaires du Grès à Voltzia sont trop incomplets pour permettre une détermination précise. Le contact entre les deux valves, qui ne s'effectue pas suivant un plan, est caractéristique du genre Hoernesia. Par contre, la forme allongée de la coquille rappelle celle de certaines espèces de Gervillia.

> Famille des Entoliidae KOROBKOV, 1960 Genre Entolium MEEK, 1865

Entolium discites (v. SCHLOTHEIM, 1820) Pl. V, fig. 4

1907 - Pecten (Entolium) discites SCHLOT. - Schmidt, p. 75; texte-fig. 3; pl. I, fig. 2
1928 - Pecten discites SCHLOT. - Schmidt, p. 157; texte-fig. 336.

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une dizaine d'exemplaires.

Gisements - Grès à meules : Bust (16)

Grès argileux : Adamswiller (8), Ottwiller.

<u>Description</u> - Valves plates et subcirculaires, à oreillettes sensiblement égales. Angle formé par le crochet supérieur à 90°. Surface externe de la coquille à côtes radiales et stries d'accroissement peu apparentes. Surface interne à stries fines, s'affrontant parfois selon un angle aigu et recoupées par des stries concentriques. La paroi interne de la coquille porte deux lames obliques, de part et d'autre de la fossette ligamentaire, formant entre elles un angle droit.

Dimensions : la largeur de la coquille varie de 2 à 8 cm.

Remarques - Les exemplaires d'Adamswiller sont de grande taille et tout à fait conformes aux descriptions de SCHMIDT (1928). Les coquilles provenant d'Ottwiller sont beaucoup plus petites et leur face externe est lisse.

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u>. E. discites est très commun dans le Trias à faciès germanique du Buntsandstein supérieur au Muschelkalk. Dans les Alpes, il est connu du Werfénien au Norien (KUTASSY, 1931).

Famille des Pectinidae RAFINESQUE, 1815 Genre Eopecten DOUVILLÉ, 1897

Eopecten cf. albertii (GOLDFUSS, 1838)

1880 - Monotis albertii GOLDF. - Noetling, p. 315; pl. XIV, fig. 1-4.
1915 - Velopecten albertii GOLDF. - Assmann, p. 598; pl. 31, fig. 16.
1928 - Pecten albertii GOLDF. - Schmidt, p. 161; texte-fig. 346.

Matériel - Collection Gall : un exemplaire

Gisement - Grès argileux : Adamswiller (8)

<u>Description</u> - Petite coquille circulaire, convexe. Oreillettes petites, sensiblement égales ; côtes radiales fortes et nombreuses, un peu flexueuses.

Dimensions : largeur de la valve 1,5 cm

Remarque - L'unique exemplaire de cette espèce est mal conservé. Son attribution à E. albertii doit être faite avec réserves.

Répartition stratigraphique et géographique - Du Buntsandstein supérieur au Keuper inférieur dans le Trias à faciès germanique et, dans les Alpes, du Werfénien au Carnien (SPECIALE, 1967).

Pectinacea Indéterminés

Matériel - Collections Grauvogel et Gall ; une trentaine d'exemplaires

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Bust (18), Vilsberg Grès argileux : Ottwiller

<u>Description</u> - Ces coquilles, de petite taille (1 cm de large) sont mal conservées. Le contour sensiblement équilatéral des valves et la présence de côtes radiales les rapprochent des Pectinacea.

Famille des Terquemiidae Cox, 1964 Genre *Enantiostreon* BITTNER, 1901

Enantiostreon cf. difforme (v. SCHLOTHEIM)

1912 - Enantiostreon difforme SCHLOT. - Frech, p. 33; pl. V, fig. 2.
1915 - Enantiostreon difforme SCHLOT. - Assmann, p. 591; texte-fig. 1; pl. 30, fig. 17-19.

Matériel - Collection Gall : un exemplaire

Gisement - Grès argileux : Ottwiller

<u>Description</u> - Coquille ovale, à contour irrégulier, portant une dizaine de côtes radiales très saillantes, parfois bifurquées. La région umbonale demeure lisse.

Dimensions : largeur de la coquille 15 mm

Ecologie - E. difforme est un Lamellibranche vivant fixé sur d'autres coquilles (SEILACHER, 1954 b).

Répartition stratigraphique et géographique - E. difforme est connu du Muschelkalk et du Carnien (KUTASSY, 1931).

Ordre des TRIGONIOIDA DALL, 1889 Famille des Myophoriidae BRONN, 1849 Genre Myophoria BRONN, 1834

Myophoria vulgaris (v, SCHLOTHEIM, 1820)

Pl. V, fig. 6

1864 - Myophoria vulgaris SCHLOT. - V. Alberti, p. 106 ; pl. I, fig. 12. 1912 - Myophoria vulgaris SCHLOT. - RÜBENSTRUNK, p. 171 ; pl. VII, fig. 6. 1928 - Myophoria vulgaris SCHLOT. - Schmidt, p. 189 ; texte-fig. 441.

<u>Matériel</u> - Collection Bill : un exemplaire Collections Grauvogel et Gall : une centaine d'exemplaires

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Adamswiller (8), Arzviller (27), Bust (16), Hangviller (21), Petersbach (9), Vilsberg, Waldhambach (5), Wasselonne - Grès argileux : Adamswiller (8), Arzviller (27) ; Hangviller (20), Soultz-les-Bains

<u>Description</u> - Coquille triangulaire, presque aussi haute que large, à bord postérieur tronqué. Flanc antérieur parcouru par une côte radiale. Aréa postérieur délimité par une forte carène marginale et portant une ou deux côtes radiales. Le coefficient de Seebach (rapport de la distance entre la carène marginale et la cote radiale antérieure sur la longueur correspondante de la carène marginale) varie de 1/2,40 à 1/2,79. Stries d'accroissement bien marquées, dessinant une ligne concave entre la carène marginale et la côte antérieure.

Dimensions : la longueur des valves varie de 0,5 à 2 cm

Affinités - Les myophories pourvues d'une seule côte située en avant de la carène marginale ont été réparties en plusieurs espèces, essentiellement d'après la valeur prise par le coefficient de Seebach. Les valeurs moyennes sont de 1/2 pour M. transversa BORNEMANN, de 1/4 pour M. intermedia SCHAUROTH et comprises entre 1/2,40 et 1/2,79 pour M. vulgaris SCHLOT. (RÜBENSTRUNK, 1912). Or il existe souvent un passage graduel entre ces trois formes. Ainsi, dans le Grès argileux d'Arzviller, se rencontre une myophorie plus allongée que les autres, dont le coefficient de Seebach se rapproche de celui de M. transversa. D'après FRANK (1928, 1929), ces trois myophories seraient des variétés écologiques d'une même espèce : M. vulgaris représenterait la forme marine normale dont dériveraient M. transversa et M. intermedia, par suite de l'adaptation à la vie dans des eaux saumâtres.

Ecologie - Les myophories semblent liées à des fonds vaseux et à des eaux peu profondes (FRANK, 1929). Dans des eaux calmes, leur coquille est plus petite et plus plate que dans des milieux agités. De telles conditions expliqueraient la faible taille des myophories du Grès à Voltzia $(0,5 \ a \ 2 \ cm)$ par rapport à celles du Muschelkalk (jusqu'à 5 cm).

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - Dans le Trias de faciès germanique, M. vulgaris est connu du Buntsandstein supérieur jusqu'au Muschelkalk supérieur. Dans le Trias alpin, elle fut signalée dans l'Anisien et le Ladinien (SPECIALE, 1967). M. transversa et M. intermedia se rencontrent encore au Keuper.

Myophoria sp.

<u>Matériel</u> - Collections Grauvogel et Gall: très nombreux exemplaires

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Petersbach (9) Grès argileux : Adamswiller (8), Arzviller (27), Bust (16), Hangviller (20), Petersbach (9), Soultz-les-Bains

Description - De ces coquilles il ne subsiste généralement que des moules internes ferrugineux. Seule la présence de carènes et de côtes permet leur attribution au genre Myophoria.

SOUS-CLASSE DES ANOMALODESMATA DALL, 1889 Ordre des PHOLADOMYOIDA NEWELL, 1965 Famille des Pholadomyidae GRAY, 1847 Genre Homomya AGASSIZ, 1843

Homomya impressa (v. ALBERTI, 1864)

Pl. V, fig. 3

1864 - Anoplophora impressa ALB., p. 138; pl. V, fig. 2

1921 - Homomya impressa ALB. - Bender, p. 50 ; pl. IV, fig. 1

- 1936 Anoplophora impressa ALB. Firtion, pl. I, fig. 12
- <u>Matériel</u> Collection Firtion : 1 exemplaire

Collections Grauvogel et Gall : une centaine d'exemplaires

- <u>Gisements</u> Grès à meules : Arzviller (27), Cocheren, Hangviller (21), Marmoutier, Schoenbourg, Vilsberg
 - Grès argileux : Soultz-les-Bains

<u>Descriptión</u> - Coquille équivalve, allongée dans le sens antéro-postérieur, légèrement baillante. Crochet situé au niveau du tiers antérieur de la valve. Stries d'accroissement nombreuses. Une légère dépression issue du crochet et se dirigeant vers le bord palléal se manifeste par une légère concavité au niveau du bord ventral. Rapport largeur/longueur voisin de 1/2,50.

Dimensions : la longueur de la coquille varie de 1 à 6 cm

Affinités - En créant l'espèce H. impressa, v. ALBERTI avait à sa disposition 4 exemplaires provenant de Soultz-les-Bains. Dans cette même localité, elle avait été décrite par VOLTZ (1836) sous le nom de Mya ventricosa. D'après BENDER (1921), la valeur du rapport H/L (largeur/ longueur des valves) est voisine de 1/2. Or, d'après la figure de H. impressa donnée par V. ALBERTI, elle est de 1/2,38 ; cet auteur signale l'existence, à Soultz-les-Bains, d'une variété plus cylindrique, donc vraisemblablement plus allongée. C'est le cas de la plupart des formes du Grès à Voltzia, où le rapport H/L varie de 1/2 à 1/3. C'est probablement à H. impressa qu'il faut attribuer les coquilles à aspect d'"Unio" signalées par BILL (1914, p. 292) dans le Grès à Voltzia de Wasselonne et de Soultz-les-Bains.

Ecologie - Homomya est un lamellibranche fouisseur.

Répartition stratigraphique et géographique - H. impressa est connu du Buntsandstein supérieur au Muschelkalk d'Europe et semble encore se rencontrer au Keuper (BENDER, 1921).

Homomya albertii (VOLTZ)

Pl. V, fig. 5

1864 - Panopaea albertii VOLTZ - V. Alberti, p. 149; pl. V, fig. 1 1921 - Homomya albertii VOLTZ - BENDER, p. 41; pl. I, fig. 1-3 1928 - Homomya albertii VOLTZ - Schmidt, p. 207; texte-fig. 502

Matériel - Collection Gall : 3 exemplaires

Gisement - Grès argileux : Arzviller (27)

<u>Description</u> - Coquille allongée, bafilante, d'épaisseur sensiblement constante. Bord ventral régulièrement convexe. Crochet opisthogyre, très développé, situé près du milieu de la valve. Région postérieure légèrement tronquée. Une carène peu marquée se dirige du crochet vers la partie postérieure des valves. Stries d'accroissement se transformant en bourrelets dans la région antérieure.

Dimensions : longueur de la coquille, 20 à 35 mm ; largeur, 11 à 18 mm

<u>Affinités</u> - Les exemplaires du Grès à Voltzia sont nettement plus petits que ceux étudiés par BENDER (1921). H. albertii se distingue de H. impressa par la position plus centrale du crochet et la régularité du bord palléal.

Répartition stratigraphique et géographique - H. albertii se rencontre dans le Buntsandstein supérieur et le Muschelkalk (KUTASSY, 1931).

Homomya sp.

<u>Matériel</u> - Collection Grauvogel : une dizaine d'exemplaires

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Petersbach (9) Grès argileux : Arzviller (27)

Description - Moules internes et externes de coquilles allongées dont le crochet, est situé vers le milieu des valves.

Famille des Pleuromyidae DALL, 1900 Genre Pleuromya AGASSIZ, 1842

Pleuromya elongata (v. SCHLOTHEIM, 1823)

Pl. V, fig. 7

1921 - Pleuromya elongata SCHLOT. - Bender, p. 90; pl. III, fig. 2-3. 1928 - Pleuromya elongata SCHLOT. - Schmidt, p. 206; texte-fig. 500.

<u>Matériel</u> - Collection Gall : 4 exemplaires

Gisement - Grès argileux : Soultz-les-Bains

<u>Description</u> - Coquille équivalve, allongée, baillante, nettement plus épaisse dans la région antérieure. Crochet antérieur. Le côté antérieur des valves est tronqué et forme un angle d'environ 45° avec le bord dorsal. Bord ventral légèrement convexe. Stries d'accroissement irrégulières. Une légère carène part obliquement du crochet vers la partie postérieure de la coquille.

32

Dimensions : la longueur des valves varie de 20 à 36 mm, leur largeur de 11 à 17 mm Ecologie - Pleuromya est un lamellibranche fouisseur.

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - Dans le Trias à faciès germanique, P. elongata se rencontre du Buntsandstein supérieur jusqu'au Keuper et, dans les Alpes méridionales, au Werfénien et à l'Anisien (SPECIALE, 1967)

Pleuromya sp.

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une vingtaine d'exemplaires

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Bust (18). Grès argileux : Arzviller (27), Petersbach (9)

Description - Coquilles allongées dont le crochet est situé près du bord antérieur ; les moules internes sont nettement plus épais dans la région antérieure.

CLASSE DES GASTÉROPODES SOUS-CLASSE DES PROSOBRANCHES Ordre des ARCHAEOGASTROPODA THIELE, 1925 Sous-ordre des Neritopsina Cox et KNIGHT, 1960 Famille des Neritopsidae GRAY, 1847 Genre Naticopsis M'COY, 1844

Naticopsis gaillardoti LEFROY, 1826 Pl. V, fig. 9

1898 - Naticopsis gaillardoti LEFR. - Koken, p. 9; pl. I, fig. 1 et 3 1928 - Trachynerita gaillardoti LEFR. - Schmidt, p. 239; texte-fig. 612

<u>Matériel</u> - Collection Schumacher : 3 exemplaires Collections Grauvogel et Gall : une centaine d'exemplaires

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Petersbach (9), Volmunster Grès argileux : Arzviller (27), Phalsbourg, Soultz-les-Bains

<u>Description</u> - Coquille globuleuse et lisse, formant un cône surbaissé dont le dernier tour est très ample. Sutures doublées par une profonde gouttière. Péristome ovale à bord columellaire renforcé. Stries d'accroissement incurvées vers l'arrière.

Dimensions : la plus grande dimension de la coquille varie de quelques millimètres à 35 mm

Remarque - Tous les échantillons récoltés sont aplatis suivant des plans variables, ce qui rend la détermination spécifique délicate.

Répartition stratigraphique et géographique - N. gaillardoti est connu, dans le Trias de faciès germanique, dans le Buntsandstein supérieur et le Muschelkalk inférieur et dans les Alpes, dans le Werfénien et l'Anisien (DIENER, 1926).

Ordre des CAENOGASTROPODA Cox, 1959 Super-Famille des Loxonematacea KOKEN, 1889 Genre Loxonema PHILLIPS, 1841

Loxonema obsoletum (v. ZIETEN, 1830)

Pl. V, fig. 10

1864 - Turritella obsoleta SCHLOT. - V. Alberti, p. 172; pl. VI, fig. 9. 1898 - Loxonema obsoletum ZIET. - Koken, p. 25; pl. IV, fig. 5-6. 1928 - Loxonema obsoletum ZIET. - Schmidt, p. 247; texte-fig. 643.

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une dizaine d'exemplaires

Gisements - Grès à meules : Lohr (13)

Grès argileux : Arzviller (27), Soultz-les-Bains

<u>Description</u> - Coquille à spire élevée, de grande taille. Angle apical voisin de 35°. 6 à 7 tours de spire lisses et régulièrement convexes, le dernier tour étant plus globuleux. Péristome ovale.

Dimensions : longueur de la coquille 3 à 10 cm

<u>Affinités</u> - Tous les exemplaires étudiés sont plus ou moins aplatis. Une confusion est possible avec L. detritum (v. ALBERTI) qui se rencontre dans les mêmes niveaux. Cependant, chez cette dernière espèce, l'angle au sommet est plus faible (20°) et les tours de spire sont plus nombreux (9 à 10).

Répartition stratigraphique - L. obsoletum semble caractéristique du Muschelkalk inférieur.

Genre Undularia KOKEN, 1892

Undularia scalata (v. SCHLOTHEIM, 1820)

Pl. V, fig. 11

1898 - Undularia scalata SCHLOT. - Koken, p. 30; pl. III, fig. 3-5. 1928 - Undularia scalata SCHLOT. - Schmidt, p. 260; texte-fig. 694.

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une dizaine d'exemplaires

Gisements - Grès argileux ; Arzviller (27), Soultz-les-Bains

<u>Description</u> - Coquille allongée, de grande taille. Angle apical voisin de 35°. Tours de spire légèrement concaves par suite de l'existence d'un bourrelet de part et d'autre de la suture. Péristome losangique. Stries d'accroissement concaves vers l'ouverture.

Dimensions : longueur de la coquille 5 à 11 cm

<u>Affinités</u> - U. scalata diffère de U. dux PICARD par la valeur de l'angle apical. Un échantillon provenant d'Arzviller (GAST 1) montre des bourrelets un peu noduleux qui accentuent la dépression au fond de laquelle se trouve la suture. Il s'agit de la variété U. scalata alsatica KOKEN déjà signalée dans le Grès coquillier de Soultz-les-Bains et de Petersbach (KOKEN, 1898, p. 31).

Répartition stratigraphique et géographique - U. scalata est caractéristique du Muschelkalk. Dans le Trias alpin, des formes voisines furent signalées à l'Anisien et au Ladinien (DIENER, 1926).

34

GASTÉROPODES INDÉTERMINÉS

Matériel - Collection Gall : très nombreux fragments

Gisement - Grès argileux : Hangviller (20).

Description - Petits fragments de moules internes appartenant à des coquilles faiblement coniques.

INTÉRÊT PALÉOÉCOLOGIQUE DES MOLLUSQUES DU GRÈS À VOLTZIA

Presque tous les Mollusques du Grès à Voltzia se retrouvent également dans le Muschelkalk d'Europe et dans le Trias de faciès alpin. Ils y sont associés à une faune franchement marine comprenant des Céphalopodes et des Echinodermes (LEONARDI, 1967). Leur présence est donc un indicateur d'influences marines.

> EMBRANCHEMENT DES ARTHROPODES SUPER-CLASSE DES CHÉLICÉRATES CLASSE DES MEROSTOMATA DANA, 1852 SOUS-CLASSE DES XIPHOSURA LATREILLE, 1802 Ordre des XIPHOSURIDA LATREILLE, 1802 Sous-ordre des Limulina Richter et Richter, 1929 Famille des Mesolimulidae Stormer, 1952 Genre Limulitella Stormer, 1952

> > Limulitella bronni (SCHIMPER, 1853) Pl. VII, fig. 1

1853 - Limulites bronni SCHIMPER, p. 6; pl. III 1914 - Limulites bronni SCHIMPER - Bill, p. 327; pl. 15, fig. 8

<u>Matériel</u> - Collection Schimper : holotype

Collections Grauvogel et Gall : une cinquantaine d'exemplaires (LIM) <u>Gisements</u> - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Bust (17), Marmoutier, Phalsbourg, Vilsberg, Wasselonne (locus typicus)

Description - Corps sans segmentation apparente, comportant un bouclier céphalothoracique en forme de fer à cheval, un bouclier abdominal étroit, trapézoïdal et un long telson styliforme, caréné et mobile. L'abdomen est un peu plus court que le céphalothorax. La longueur du telson peut dépasser celle du reste du corps. Céphalothorax trilobé avec une crête médiane, deux sillons latéraux obliques et deux crêtes oculaires ; pointes génales bien développées. La carapace se réfléchit ventralement en une large doublure. Abdomen avec une crête médiane et deux sillons latéraux prolongeant ceux du céphalothorax. Les parties externes des aires pleurales sont délimitées par un épaississement chitineux de la face ventrale et portent 6 ou 7 épines latérales mobiles. Bords latéro-postérieurs de l'abdomen terminés en pointe.

Dimensions : la longueur totale du corps (telson non compris) varie de 5,7 à 120 mm.

Remarques - Limulitella se distingue du genre Psammolimulus LANGE, également du Buntsandstein, par des pointes génales moins effilées, des expansions latéro-postérieures de l'abdomen plus réduites et un développement moindre de la première épine abdominale (MEISCHNER, 1962). Il diffère de Mesolimulus STØRMER par un bouclier abdominal plus étroit et l'angle que forme le bord interne des pointes génales avec le bord latéro-antérieur de l'abdomen (STØRMER, 1952). Ces deux derniers caractères sont souvent difficiles à vérifier. En effet, la plupart des limules du Grès à Voltzia présentent un bouclier abdominal presque triangulaire par suite de la rupture d'une partie des aires pleurales au voisinage de l'épaississement chitineux ventral. Les épines manquent alors. C'est le cas de l'holotype de L. bronni, reproduit dans tous les manuels, et de L. vicensis décrit par BLEICHER (1897), qui appartiennent vraisemblablement tous deux à une seule et même espèce. Par contre, chez les exemplaires complets, l'abdomen est nettement plus large et présente un contour trapézoital. De plus, l'angle que forme le contact entre les deux parties du corps est alors plus faible.

Les limules de l'ère secondaire constituent un enchaînement de formes. Au fur et à mesure qu'augmente le nombre d'échantillons récoltés, les limites entre espèces et même entre genres s'estompent. Nombre d'entre eux ont, en effet, été définis à partir d'un unique échantillon, souvent incomplet. D'autre part, l'étude du développement des représentants actuels fait apparaître d'importantes variations dans la forme et l'ornementation du corps au cours des mues successives (MEISCHNER, 1962). Ces variations devaient exister chez les formes triasiques. Elles compliquent la tâche du paléontologue qui risque de les prendre pour des caractères spécifiques. L'analyse statistique des caractères quantitatifs d'un matériel plus abondant permettrait de faire la part de ce phénomène (TINTANT, 1952, 1966). L'étonnante ressemblance morphologique entre les limules du Trias et les limules actuelles se manifeste également au niveau des appendices, lorsque ceuxci sont conservés (MEISCHNER, 1962). Comme Triops cancriformis, Limulitella fait partie d'une lignée bradytélique dont l'organisation était stabilisée dès le début de l'ère secondaire.

Ecologie - Les limules actuelles sont des organismes benthiques, essentiellement fouisseurs. C'était également le mode de vie des formes triasiques. A l'ère secondaire, elles peuplaient les eaux douces ou saumâtres, plus rarement la mer (ST ϕ RMER, 1955).

Répartition stratigraphique et géographique - L'holotype de Limulitella bronni provient du Grès à Voltzia de Wasselonne. Les Limulina sont largement répandus dans tout le Trias de faciès germanique (BLEICHER, 1897 ; KIRCHNER, 1923 ; MEICHNER, 1962 ; VIA BOADA et de VILLALTA, 1966).

CLASSE DES ARACHNIDA LAMARCK, 1801 SOUS-CLASSE DES LATIGASTRA PETRUNKEVITCH, 1949 Ordre des SCORPIONIDA LATREILLE, 1817 Sous-ordre des Euscorpionina PETRUNKEVITCH, 1949 Super-Famille des Scorpionoidea LEACH, 1815 Famille des Eoscorpiidae Scudder, 1884

Genre indéterminé

Pl. VI, fig. 2-4

<u>Matériel</u> - Collection Grauvogel : une quinzaine d'exemplaires (SC) et de très nombreux tergites isolés

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Bust (17, 18), Marmoutier, Oeting, Schoenbourg, Vilsberg

<u>Description</u> - Céphalothorax trapézoidal, plus large que long, prolongé par une expansion antérieure triangulaire supportant une paire d'yeux. Préabdomen de 7 segments. Stigmates pulmonaires s'ouvrant en piveau du tiers postérieur des sternites. Segments du postabdomen plus longs que larges,

couverts de granules et de soies. Telson prolongé par un dard. Pédipalpes très développés, terminés par des pinces effilées et lisses. Pattes ambulatoires aux tibias minces et très allongés ; tarses probablement prolongés par 2 griffes. Sternum étroit, trapézoïdal, servant d'appui aux coxas des deux dernières paires d'appendices locomoteurs ; les coxas des deux pattes antérieures se prolongent par des lames masticatrices. Peignes comportant, chez les adultes, une quarantaine de lamelles.

Dimensions : la longueur totale du corps varie de 17 à 65 mm

<u>Affinités</u> - La classification de PETRUNKEVITCH (1953, 1955) accorde une grande importance à la disposition des coxas des pattes locomotrices autour du sternum. Les scorpions du Grès à Voltzia montrent clairement que celle-ci correspond à la structure typique des Scorpionoidea, telle qu'elle s'observe chez de nombreuses formes carbonifères et actuelles. Les scorpions étudiés semblent appartenir à un même genre. Par la disposition des coxas et celle des stigmates pulmonaires, qui sont situés loin du bord des segments abdominaux, ils s'écartent notablement des Mésophonidés décrits dans le Trias de Grande Bretagne (WILLS, 1910, 1947).

Ecologie - Les scorpions du Grès à Voltzia sont des Arthropodes terrestres. Leur mode de vie ne devait guère différer de celui des représentants actuels du groupe.

SOUS-CLASSE DES CAULOGASTRA POCOCK, 1893 Super-ordre des LABELLATA PETRUNKEVITCH, 1949 Ordre des ARANEIDA CLERCK, 1757

Famille indéterminée

Pl. VI, fig. 1

<u>Matériel</u> - Collection Grauvogel : une douzaine d'exemplaires (AR)

Gisements - Grès à meules : Adamswiller (8), Arzviller (27), Bust (18), Vilsberg

<u>Description</u> - Araignées de petite taille : la longueur du corps varie de 2 à 7 mm. Sternum ovale, 4 paires de pattes très velues. Pédipalpes formés de 6 articles, presque aussi longs que les pattes. Abdomen ovale, velu, non segmenté ; il est prolongé postérieurement par une paire de filières, sans segmentation apparente.

<u>Affinités</u> - Les araignées du Grès à Voltzia semblent appartenir à un même genre. Leur présence est d'autant plus intéressante que les représentants fossiles de ce groupe n'ont été décrits jusqu'à présent que de gisements de l'ère primaire et de l'ère tertiaire. Les formes du Buntsandstein ressemblent beaucoup aux araignées modernes ; en particulier, l'abdomen n'est plus segmenté comme dans la plupart des espèces paléozoïques.

<u>Ecologie</u> - Les araignées sont des Arthropodes à respiration aérienne. Grâce à leur petite taille, ils ont facilement pu être transportés par le vent et entra \hat{m} és dans le milieu aquatique.

SUPER-CLASSE DES CRUSTACÉS

CLASSE DES BRANCHIOPODA LATREILLE, 1817

Ordre des NOTOSTRACA SARS, 1867 Famille des Triopsidae KEILHACK, 1910

Genre Triops SHRANK, 1803

Triops cancriformis (SCHAEFFER, 1756) Triops cancriformis minor TRUSHEIM, 1937 Texte-fig. 6 ; pl. VII, fig. 3 et 4

1853 - Apudites antiquus SCHIMPER, p. 7 ; pl. III. 1937 - Triops cancriformis minor TRUSHEIM, p. 198 ; texte-fig. 19 ; pl. 13, fig. 2-5 ; pl. 14, fig. 1-4.

1953 - Apus cancriformis minor TRAUTH - Dechaseaux, p. 260; texte-fig. 11.

Matériel - Collection Schimper : un exemplaire Collection Grauvogel : une vingtaine d'exemplaires (AP 1 - AP 22)

Gisements - Grès à meules : Arzviller (27), Soultz-les-Bains, Vilsberg

Description - Corps composé par un nombre variable de segments (24 à 44) et recouvert antérieurement par un bouclier dorsal. Celui-ci est circulaire ou légèrement ovale, échancré dans la région postérieure et parcouru par une carène médiane. Il porte deux yeux composés sessiles. La partie libre de l'abdomen se termine par une fourche caudale dont les deux rames sont multiarticulées et de taille inégale. Pattes foliacées et lobées, semblables à celles des Triops actuels,



Figure 6 - Reconstitution de Triops cancriformis minor TRUSHEIM (x3) Face dorsale. (d'après TRUSHEIM, 1937).

Dimensions : la longueur de la carapace des exemplaires du Grès à Voltzia varie de 3 à 16 mm <u>Affinités</u> - L'organisation des formes fossiles de T. cancriformis est étonnament identique -à celle de l'espèce actuelle. TRUSHEIM (1937), qui en étudia 500 exemplaires provenant du Keuper d'Allemagne, constata que les exemplaires fossiles ne différaient de leurs descendants que par une taille plus faible. Aussi proposa-t-il la création d'une sous-espèce nouvelle, Triops cancriformis minor. Ce crustacé illustre remarquablement la notion de lignée bradytélique, c'est-à-dire celle d'un groupe zoologique dont la vitesse d'évolution demeure très lente au cours du temps.

Ecologie - Les Triops actuels sont des mangeurs de détritus qui peuplent les flaques d'eaux temporaires, douces ou saumâtres (TASCH, 1969). L'assèchement du milieu est d'ailleurs indispensable à l'éclosion des ceufs. Au Trias, leur mode de vie ne semble guère avoir été différent (TRUSHEIM, 1937).

Répartition stratigraphique et géographique - T. cancriformis minor est connu du Buntsandstein (SCHIMPER, 1853; SOERGEL, 1928) et du KEUPER (TRUSHEIM, 1937) de France et d'Allemagne.

Ordre des CONCHOSTRACA SARS, 1867

L'unanimité est loin d'être réalisée sur la nomenclature et la distribution stratigraphique des Conchostracés fossiles (BUSNARDO, 1969). De nombreuses études furent consacrées aux esthéries du Trias à faciès germanique et plus particulièrement à celles du Buntsandstein (DEFRETIN, 1950 ; REIBLE, 1962 ; DEFRETIN-LEFRANC, 1963). Mais la définition de beaucoup d'espèces reste encore imprécise. Une révision des esthéries triasiques par des techniques modernes, telle l'utilisation du microscope électronique à balayage (WARTH, 1969), s'avère souhaitable. Cependant, une pareille étude dépassant le cadre de ce mémoire, seules les formes parfaitement caractérisées seront décrites et figurées ici.

> Famille des Isauridae BOCK, 1953 Genre Isaura JOLY, 1842

Isaura minuta (v. ZIETEN, 1833)

Bien que cette espèce soit fréquemment citée dans le Trias de faciès germanique, aucun type n'a encore été unaniment désigné. Aussi sa définition diffère-t-elle parfois sensiblement d'un auteur à l'autre (JONES, 1862 ; DEFRETIN-LEFRANC, 1950, 1963 ; REIBLE, 1962 ; WARTH, 1969). Dans la présente étude sera retenue la diagnose proposée par REIBLE, les néotypes créés par cet auteur m'ayant été aimablement communiqués pour étude par l'Institut de Paléontologie de Würzburg.

> Isaura minuta minuta (v. ZIETEN, 1833) Pl. VIII, fig. 1 et 2

1962 - Isaura minuta minuta (ZIET.) Reible, p. 205 ; texte-fig. 11 ; pi. 6, fig. 3-5, 7 ; pl. 7, fig. 4-6.

Matériel - Collections Grauvogel et Gall ; plus d'un millier d'exemplaires (E)

Gisements - Grès à meules : Adamswiller (7, 8), Arzviller (27), Bust (16, 17, 18), Cocheren, Hangviller (20, 21), Marmoutier, Oeting, Petersbach (9, 11), Phalsbourg, Vilsberg

<u>Description</u> - Valves convexes, telliniformes, de petite taille. Crochet proéminent, situé près du bord antérieur de la carapace. Bord dorsal légèrement incurvé, parfois rectiligne. Lignes de croissance nombreuses (12 à 30) et bien apparentes. Microstructure du test réticulée, comportant 6 à 8 mailles par zone de croissance. Il existe un dimorphisme sexuel accusé : les carapaces des femelles ont une forme plus allongée et plus ovale que celles des mâles

Dimensions du néotype défini par REIBLE : longueur de la carapace, L = 3,3 mm ; hauteur H = 2,4 mm ; L/H = 1,37

Quelques échantillons de I. minuta minuta du Grès à Voltzia atteignent 5 mm de long.

Remarques - I. minuta minuta est l'organisme le plus fréquent du Grès à Voltzia. Il y constitue parfois des populations monospécifiques de plusieurs centaines d'individus. Certains exemplaires renferment des restes corporels. La valeur du rapport L/H dépend d'une part du dimorphisme sexuel et d'autre part du degré d'écrasement de la carapace. Elle peut varier de 1,20 à 1,45. Beaucoup d'échantillons rapportés à I. minuta minuta présentent un bord dorsal rectiligne et peuvent être rapprochés de I. minuta albertii (VOI.TZ) dont un néotype a été défini par REIBLE (1962, p. 207). Cependant le rapport L/H n'atteint pas les fortes valeurs proposées pour cette dernières sous-espèce (1,45 à 1,75).

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - Isaura minuta minuta est une espèce cosmopolite qui se rencontre dans le Trias à faciès germanique du Buntsandstein moyen jusqu'au Keuper inférieur.

Isaura sp. A

Pl. III, fig. 3

Matériel - Collection Grauvogel ; une centaine d'exemplaires (E)

Gisements - Grès à meules : Arzviller (27), Vilsberg

<u>Description</u> - Valves convexes, cycladiformes, de grande taille. Crochet situé dans le tiers antérieur de la carapace. Bord dorsal rectiligne. Lignes de croissance bien apparentes et très nombreuses (18 à 40, parfois plus de 50), devenant plus serrées près du bord ventral. Microstructure du test réticulée comportant 4 à 8 mailles par zone de croissance ; cette réticulation est remplacée, près du bord de la carapace, par des stries radiaires

Dimensions : la longueur L de la carapace varie de 5 à 9 mm, la hauteur H de 4 à 7 mm ; L/H oscille entre 1,25 et 1,50.

<u>Affinités</u> - Isaura sp. A est le géant des esthéries du Grès à Voltzia. La forme de la carapace évoque celle de I. dorsorecta REIBLE (1962, p. 213). Mais la microstructure du test, qui comporte à la fois des polygones et des stries, est celle de I. laxitexta laxitexta (JONES) décrite par REIBLE (1962, p. 210). A Isaura sp. A sont parfois associées des carapaces plus nettement triangulaires ; le rapport L/H peut alors atteindre des valeurs de 1,10 à 1,20. Cependant les caractères de la microstructure sont identiques. Cette différence de forme correspond peutêtre à un dimorphisme sexuel.

Isaura sp. B

Pl. VIII, fig. 4

<u>Matériel</u> - Collection Grauvogel : une centaine d'exemplaires (E) <u>Gisements</u> - Grès à meules : Adamswiller (7), Vilsberg <u>Description</u> - Valves telliniformes, de petite taille. Crochet situé près du tiers antérieur de la carapace. Bord dorsal incurvé. Bord ventral rectiligne. Lignes de croissance très apparentes et nombreuses (10 à 20), devenant plus serrées près du bord ventral. Chacune est constituée par un bourrelet d'environ 30 μ de large encadré par deux fins sillons. La microstructure du test consiste en un réseau d'alvéoles polygonaux ; il y a 5 à 7 mailles par zone de croissance.

Dimensions : la longueur L de la carapace varie de 1 à 4 mm, la hauteur H de 0,8 à 3 mm ; L/H varie de 1,30 à 1,60.

Remarques - Cette espèce est bien caractérisée par sa petite taille et le contour de sa carapace. Elle se distingue sans difficulté de toutes les autres esthéries du Grès à Voltzia et ne semble correspondre à aucune forme déjà décrite.

> Famille des Limnadiidae BAIRD, 1849 Genre Palaeolimnadia RAYMOND, 1946

Palaeolimnadia alsatica REIBLE, 1962 Pl. IX, fig. 1 et 4; Pl. XXIV, fig. 1

1962 - Palaeolimnadia alsatica REIBLE, p. 218; texte-fig. 19 et pl. 9, fig. 7.

Matériel - Collection Grauvogel : une centaine d'exemplaires (E)

Gisements - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Marmoutier, Vilsberg

Description - Valves cycladiformes à bord dorsal rectiligne. Crochet situé dans le tiers antérieur de la carapace. Aréa apical très développé et lisse. Lignes de croissance peu nombreuses (5 à 8). Elles consistent en un bourrelet d'environ 50 μ de large encadré par deux fins sillons. Zones de croissance larges, la plus externe étant la plus étroite. Test mince à microstructure peu apparente ; celle-ci consiste en alvéoles polygonaux allongés dont le grand axe est parallèle aux lignes de croissance. On compte 7 à 10 mailles par zone de croissance

Dimensions de l'holotype : longueur L de la carapace 4,1 mm, hauteur H 2,9 mm ; L/H = 1,41

Remarques - Les exemplaires étudiés ne diffèrent de l'holotype (aimablement communiqué par l'Institut de Géologie de Freiburg im Breisgau) que par une taille plus grande (5 à 6 mm de long). Ceci se traduit par le nombre plus élevé des stries d'accroissement et la valeur du rapport L/H qui peut dépasser 1,50. La microstructure du test n'a pas été observée par REIBLE. Quelques carapaces renferment des vestiges du corps de l'animal : les mâchoires, la furca et le remplissage du tube digestif en sont les éléments les plus apparents. D'autres exemplaires contiennent des oeufs. C'est à P. alsatica qu'il faut attribuer les oeufs de grande taille (0,10 à 0,13 mm de diamètre) rapportés par erreur à Euestheria albertii JONES (GALL et GRAUVOGEL, 1966). D'autres oeufs, nettement plus petits (0,020 à 0,075 mm) et beaucoup plus abondants (plusieurs centaines par carapace), ont également été rencontrés. Sans doute s'agit-il de deux types de pontes correspondant, dans le premier cas à des oeufs de durée, dans le second cas à des oeufs à développement immédiat.

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - L'holotype de Palaeolimnadia alsatica provient du Grès à Voltzia supérieur (Grès à meules ?) de Wasselonne.

Famille des Limnadopsidae TASCH, 1969 Genre Palaeolimnadiopsis RAYMOND, 1946

Palaeolimnadiopsis dictyonata REIBLE, 1962

Pl. IX, fig. 2

1962 - Palaeolimnadiopsis dictyonata REIBLE, p. 221 ; texte-fig. 8 ; pl. 10, fig. 1-3.

Matériel - Collection Grauvogel : une cinquantaine d'exemplaires (E).

Gisements - Grès à meules : Arzviller (27), Bust (18), Marmoutier, Vilsberg

Description - Valves limnadiformes à bord dorsal rectiligne. Crochet bien développé situé dans le tiers antérieur de la carapace. Lignes de croissance peu nombreuses (7 à 12). Microstructure du test très apparente, du type réticulé ; on compte 4 à 6 mailles par zone de croissance.

Dimensions de l'holotype : longueur L de la carapace 5,9 mm, hauteur H = 3,8 mm ; rapport L/H = 1,55 $\,$

<u>Remarques</u> - P. dictyonata est parfaitement caractérisé par le contour limnadiforme et la microstructure de la carapace. Certains exemplaires étudiés peuvent atteindre 10 mm de long.

Répartition stratigraphique et géographique - L'holotype de P. dictyonata provient du Grès à Voltzia supérieur (Grès à meules ?) de Wasselonne.

> Familie des Leaiidae RAYMOND, 1949 Genre *Praeleaia* LYUTKEVICH, 1929

> > Praeleaia sp.

Pl. IX, fig. 3

Matériel - Collection Grauvogel : deux exemplaires (E 22)

Gisement - Grès à meules : Vilsberg

<u>Description</u> - Valves cycladiformes. Crochet situé près du bord antérieur de la carapace. Bord dorsal rectiligne. Lignes de croissance peu nombreuses (14). La carapace supporte trois côtes qui divergent de l'aréa apical vers le bord ventral ; une quatrième côte semble longer le bord dorsal. La microstructure du test est du type réticulé, comportant 4 mailles par zone de croissance. Dimensions : longueur L de la carapace 3 mm, hauteur H 2,2 mm ; L/H = 1,36.

<u>Affinités</u> - La conservation de cette espèce est trop imparfaite pour permettre une détermination précise. Cependant ses caractères sont voisins de ceux de Estheriella nodosocostata GIEBEL du Buntsandstein (PICARD, 1909) et de Praeleaia sp. du Keuper décrit et figuré par WARTH (1969).

ÉCOLOGIE DES CONCHOSTRACÉS

Les esthéries fossiles sont fréquentes dans les sédiments d'eaux douces et d'eaux saumâtres. Elles sont plus rares dans les dépôts marins francs (TASCH, 1969). Les formes actuelles peuplent les collections d'eau temporaires, stagnantes ou à agitation modérée, comme les étangs et les lagunes. Elles y accomplissent leur cycle biologique en l'espace de quelques semaines (KOBAYASHI,
1954 ; REIBLE, 1962). Lorsque le milieu s'assèche, leurs oeufs peuvent être dispersés par le vent sur des distances considérables (DECHASEAUX, 1951). Un tel mode de vie ne semble guère s'être modifié depuis la fin de l'ère primaire. Tout au plus les espèces triasiques paraissentelles avoir été plus tolérantes aux variations physico-chimiques du milieu (REIBLE, 1962).

CLASSE DES OSTRACODA LATREILLE, 1806 Ordre des PODOCOPIDA MÜLLER, 1894 Super-Famille des Cytheracea BAIRD, 1850 Famille des Glorianellidae Schneider, 1960 Genre Triassinella Schneider, 1956

Triassinella aff. tsorfatia (SOHN, 1968) Pl. VII, fig. 2

1968 - Judahella tsorfatia SOHN, p. 15; pl. 3, fig. 6-7, 11-16, 20-21.
1968 - Ophthalmonodella reticulata KNÜPFER et KOZUR, p. 328; texte-fig. 3, pl. I, fig. 1 a-c, 2, 4-9, 11 a-b, 12.
1970 - Triassinella tsorfatia (SOHN, 1968) - Kozur, p. 16.

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : très nombreux échantillons (OST)

Gisements - Grès à meules : Adamswiller (8), Bust (17)

<u>Description</u> - Carapace allongée, de contour trapézoïdal. Valves à surface réticulée. Région antérieure arrondie, plus haute que la région postérieure. Zone marginale bien développée. Bord dorsal rectiligne supportant 4 tubercules. Bord ventral presque droit avec 2 tubercules peu accentués. Charnière non observée.

Dimensions moyennes de la carapace : longueur 0,75 mm, hauteur 0,35 mm

<u>Affinités</u> - La taille des formes du Grès à Voltzia est légèrement plus élevée que celle de l'espèce du Muschelkalk.

Ecologie - Le genre Triassinella est marin.

Répartition stratigraphique et géographique - Muschelkalk inférieur d'Allemagne et Muschelkalk supérieur de France (Faulquemont, Moselle).

Cytheracea indéterminés

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : très nombreux échantillons

Gisements - Grès à meules : Adamswiller (8), Bust (17)

<u>Description</u> - La forme de la carapace est celle des Cytheracea. L'état de conservation des échantillons ne permet pas d'observer l'ornementation des valves. Certaines formes rappellent le genre Cultella LYUBIMOVA (KOZUR, 1968).

OSTRACODES INCERTAE SEDIS Pl. I, fig. 10

1968 a - Ostracodes - Gall et Grauvogel, p. 56 ; pl. I, fig. 1, 3.

Matériel - Collection Gall : lames D la, D lb, HA 23-2, Va, Sz 3

Gisements - Grès à meules : Phalsbourg, Hangviller (21), Vilsberg

Grès argileux : Soultz-les-Bains

 $\frac{Description}{minables.}$ - Ces Ostracodes n'ont pu être observés qu'en plaques minces. Ils ne sont pas déterminables.

CLASSE DES EUTHYCARCINOIDEA GALL et GRAUVOGEL, 1964

Ordre des EUTHYCARCINIDA GALL et GRAUVOGEL, 1964

Famille des Euthycarcinidae HANDLIRSCH, 1914

Genre Euthycarcinus HANDLIRSCH, 1914

Euthycarcinus kessleri HANDLIRSCH, 1914 Texte-fig. 7 et 8 ; pl. X ; pl. XI, fig. 1 et 2

1914 - Euthycarcinus kessleri HANDL., p. 1; pl. I, fig. 1-6; pl. II, fig. 7-11 1964 - Euthycarcinus kessleri HANDL. - Gall et Grauvogel, p. 3; texte-fig. 1-3; pl. I-VIII 1969 - Euthycarcinus kessleri HANDL. - Moore, p. 196; texte-fig. 75 A - C.

<u>Matériel</u> - Collection Schimper et Mougeot : un exemplaire Collection Kessler : deux exemplaires (syntypes) Collections Grauvogel et Gall : une centaine d'exemplaires (EUT).

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Bust (17, 18), Marmoutier, Petersbach (11), Soultz-les-Bains, Vilsberg

Description - Corps allongé divisé en céphalon, thorax, abdomen et se terminant par un long telson styliforme. Tête semi-circulaire portant deux yeux composés sessiles, deux paires d'antennes uniramées et deux mandibules. Thorax à double segmentation : un bouclier dorsal de 5 écailles articulées et une face ventrale de 12 segments. 11 paires d'appendices thoraciques uniramés et multiarticulés pourvus de soies. Abdomen plus étroit que le thorax, formé de 5 segments dépourvus d'appendices. Endosquelette constitué par des poutrelles chitineuses. Tube digestif rectiligne, sans diverticules intestinaux.

Dimensions : longueur totale du corps 5 à 65 mm ; largeur du thorax 2 à 12 mm

Affinités - HANDLIRSCH (1914) créa pour le genre Euthycarcinus l'ordre des Archicopépodes. Le matériel étudié ici montre que tout rapprochement avec les Copépodes doit être abandonné (GALL et GRAUVOGEL, 1964). L'organisation de E. kessleri est entièrement originale. Elle ne se retrouve dans aucun groupe de Crustacés actuellement connu. Du Trias moyen d'Australie, RIEK (1964, 1968) a décrit une forme voisine, Synaustrus brookvalensis RIEK. Malgré quelques différences, il est possible qu'il s'agisse d'un seul et même genre. RIEK place successivement ces Arthropodes parmi les Trilobitomorphes (1964), puis parmi les Crustacés Branchiopodes (1968). Dans sa deuxième publication, cet auteur interprète le premier segment abdominal comme un segment génital faisant partie du thorax. Aucun fait d'observation n'est encore venu appuyer cette opinion.



Figure 7 - Reconstitution de Euthycarcinus kessleri HANDLIRSCH (x 3) A face dorsale B face ventrale (d'après GALL et GRAUVOGEL, 1964)



Figure 8 - Reconstruction tridimensionnelle de la partie moyenne du thorax de Euthycarcinus kessleri HANDLIRSCH. La flèche indique l'avant du corps. (d'après GALL et GRAUVOGEL, 1964)

<u>Ecologie</u> - D'après la nature du remplissage du tube digestif, Euthycarcinus était limnivore. <u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - E. kessleri n'est connu que du Grès à Voltzia du Nord des Vosges.

> CLASSE DES MALACOSTRACA LATREILLE, 1806 SOUS-CLASSE DES EUMALACOSTRACA GROBBEN, 1892 Super-ordre des SYNCARIDA PACKARD, 1885 Ordre et Famille Incertains Genre Triasocaris BILL, 1914

> > Triasocaris peachi BILL, 1914

1914 - Triasocaris peachi BILL, p. 323; pl. 15, fig. 7 <u>Matériel</u> - Collection Bill : un exemplaire (holotype). <u>Gisement</u> - Grès à Voltzia (Grès à meules ?) : Gresswiller

46

<u>Description</u> - De cet exemplaire unique et mal conservé ne subsistent que 12 segments tous semblables. La structure des appendices est inconnue. L'existence d'un long rostre prolongeant la tête est douteuse. Longeur du corps 15 mm.

<u>Affinités</u> - L'organisation de T. peachi est trop mal connue pour qu'on puisse classer avec certitude cette espèce parmi les Crustacés Syncarides. Elle n'a pas été rencontrée depuis sa description.

Super-ordre des **PERACARIDA** CALMAN, 1904 Ordre des **MYSIDACEA** BOAS, 1883 Sous-ordre des **Mysida** BOAS, 1883 Famille incertaine Genre Schimperella BILL, 1914

> Schimperella beneckei BILL, 1914 Texte-fig. 9 ; pl. XI, fig. 3

1914 - Schimperella beneckei BILL, p. 310 ; pl. 13, pl. 14 ; pl. 15, fig. 1-5 ; pl. 16, fig. 1-2.

<u>Matériel</u> - Collection Bill : holotype (n° 105), paratypes (n° 132, 157) Collections Grauvogel et Gall : plusieurs centaines d'exemplaires (n° C)

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Adamswiller (8), Arzviller (27), Bust (17, 18), Durstel, Gottenhouse, Vilsberg, Wasselonne (locus typicus)

Description - Crustacé de petite taille. La région thoracique est recouverte par une mince carapace, dépourvue de rostre, uniquement soudée à la face dorsale des segments les plus antérieurs. Abdomen formé de 6 segments dont le dernier est environ deux fois plus long que les précédents. Yeux pédonculés volumineux. Antennules biramées à sympodite épais supportant (chez les mâles ?) un organe olfactif ovale garni de soies. Antennes comportant un long fouet multiarticulé et une large écaille bordée de soies. Appendices thoraciques et abdominaux biramés. Telson allongé, trapézoïdal, à bord postérieur rectiligne. Uropodes lamelleux ; l'exopodite est articulé. Telson et uropodes sont abondamment frangés de soies.

Dimensions : la longueur moyenne du corps (antennes non comprises) est de 14 mm. Certains exemplaires peuvent cependant dépasser 20 mm

<u>Affinités</u> - Schimperella beneckei diffère essentiellement des Mysidacés actuels par l'absence apparente de statocystes au niveau des uropodes (HESSLER, 1969).

Ecologie - La plupart des Mysidacés actuels sont marins. Ils nagent à la surface de l'eau ou près du fond et se nourrissent de petits animaux ou de particules organiques (DELAMARE-DEBOUTTEVILLE, 1963). S. beneckei, qui formait d'importantes populations à l'époque du Grès à Voltzia, devait avoir un mode de vie semblable.

Répartition stratigraphique et géographique - Schimperella n'est connu que du Grès à Voltzia du Nord des Vosges.

Schimperella kessleri BILL, 1914

1914 - Schimperella kessleri BILL, p. 316 ; pl. 16, fig. 3-4.



Figure 9 - Reconstitution de Schimperella beneckei BILL (x 10) A vue dorsale B vue latérale (modifié d'après BILL, 1914)

Tous les exemplaires de cette espèce provenant du Grès à Voltzia (Grès à meules ?) des environs de Saarbrücken ont été détruits. Schimperella kessleri différait essentiellement de S. beneckei par une extension moindre de la carapace qui laissait à découvert les deux ou trois derniers segments thoraciques. Il n'a pas été retrouvé depuis sa description. Il est possible qu'il ne s'agisse en réalité que de S.beneckeidont la carapace aurait été déformée par la fossilisation.

Ordre des ISOPODA LATREILLE, 1817 Sous-ordre des Flabellifera SARS, 1882 Famille incertaine Genre Palaega Woodward, 1870

Palaega pumila GALL et GRAUVOGEL, 1971 Texte-fig. 10 ; pl. XI, fig. 4

1971 - Paleaga pumila GALL et GRAUVOGEL, p. 79; texte-fig. 1; pl. A, fig. 1-2; pl. B, fig. 1-3 <u>Matériel</u> - Collection Grauvogel : holotype (PAL 1) et une centaine de paratypes (PAL) <u>Gisements</u> - Grès à meules : Arzviller (27), Bust (17 ; locus typicus)

<u>Description</u> - Crustacé de petite taille, au corps ovale aplati dorso-ventralement. Céphalothorax ayant incorporé le premier segment thoracique et portant une paire d'yeux sessiles. Thorax de 7 segments pourvus de plaques coxales ; le segment antérieur est le plus développé. Abdomen à peine plus court que le thorax, comportant 5 segments ; le dernier segment est deux fois plus



Figure 10 - Reconstitution de Palaega pumila GALL et GRAUV. (x 25) Face dorsale (d'après GALL et GRAUVOGEL, 1971).

49

long que les précédents. Telson grand, de contour ogival, portant une carène médiane et un sillon transversal en forme de U; son bord postérieur est lisse. Antennules et antennes uniramées, de longueur inégale. Appendices thoraciques uniramés. Uropodes foliacés.

Dimensions : la longueur moyenne du corps est de 4 à 5 mm ; quelques exemplaires atteignent 8 mm

<u>Affinités</u> - L'espèce la plus proche de P. pumila est P. kunthi (v. AMMON) du Portlandien de Solnhofen. Elle en diffère par une taille plus faible et le grand développement du 5ème segment abdominal. P. pumila est le plus ancien représentant des Crustacés Isopodes. Il prouve que dès le début de l'ère secondaire, l'organisation des Isopodes Flabellifères était déjà pleinement réalisée avec l'incorporation du premier segment thoracique à la tête et la fusion du sixième segment abdominal au telson.

Ecologie - Les Palaega sont essentiellement connus de dépôts marins (VAN STRAELEN, 1928). C'étaient des Crustacés carnivores ou mangeurs de petites particules organiques, pourvus de puissantes mandibules (REIFF, 1936). Dans le Grès à Voltzia, P. pumila formait d'importantes populations qui évoquent celles des Sphaeroma des étangs saumâtres actuels.

Répartition stratigraphique et géographique - P. pumila n'a été rencontré, à l'heure actuelle, que dans le Grès à meules du Nord des Vosges.

PERACARIDA INCERTAE SEDIS

Genre Diaphanosoma BILL, 1914

Diaphanosoma rare BILL, 1914

1914 - Diaphanosoma rare BILL, p. 322; pl. 15, fig. 6

Matériel - Collection Bill : un exemplaire (holotype)

Gisements - Grès à Voltzia (Grès à meules ?) : Gresswiller

Description - Crustacé dépourvu de carapace et sans segmentation apparente. Les appendices thoraciques semblent biramés. L'abdomen porte des appendices. Longueur du corps 16 mm.

<u>Affinités</u> - L'unique exemplaire de D. rare est très abimé et ne permet pas d'assigner à cette espèce une place précise dans la classification des Crustacés. Déjà BILL (1914) avait émis l'hypothèse qu'il pourrait s'agir en réalité d'un stade larvaire de Décapode.

Super-ordre des EUCARIDA CALMAN, 1904 Ordre des DECAPODA L'ATREILLE, 1803 Sous-ordre des Dendrobranchiata BATE, 1888 Famille des Penaeidae RAFINESQUE, 1815 Genre Antrimpos MÜNSTER, 1839

> Antrimpos atavus (BILL, 1914) Texte-fig. 11 ; pl. XII, fig. 1-3

1914 - Penaeus atavus BILL, p. 305; pl. 11, fig. 3; pl. 12, fig. 4.

<u>Matériel</u> - Collection Firtion : un exemplaire Collections Grauvogel et Gall : néotype^{*} (PEN 1) et plusieurs centaines d'exemplaires (PEN)



Figure 11 - Reconstitution de Antrimpos atavus (BILL) Face dorsale (x 2, 5) La base des antennes est supposée vue par transparence à travers les écailles.

- -

Tous les types étudiés par BILL ont été détruits.

 $\underline{Gisements}$ - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Bust (17), Gresswiller, Hangviller (21), Petersbach (10), Schoenbourg, Vilsberg, Wasselonne

Description - Crustacé au corps étroit et allongé, comprimé latéralement, généralement fossilisé en position dorso-ventrale. Carapace céphalothoracique mince et lisse, portant 3 paires de courts sillons (sillons cervicaux, hépatiques et branchio-cardiaques) et deux paires d'épines dans la région antérieure. Elle se prolonge en avant par un rostre long et pointu, orné de quelques dents dorsales chez les exemplaires de grande taille. Abdomen plus long que le céphalothorax, formé de 6 segments dont le dernier est environ deux fois plus long que large. Telson triangulaire, terminé en pointe. Antennules courtes formées de deux rames inégales. Antennes comportant un long fouet multiarticulé et une large écaille dont le bord externe est différencié en épine. Troisième maxillipède garni de soies raides. Pattes thoraciques grêles et lisses, les trois premières se terminant par une pince. Appendices abdominaux inconnus. Uropodes fortement chitinisés ; l'exopodite est articulé.

Dimensions : la longueur moyenne du corps (antennes non comprises) est de 5 cm ; quelques échantillons atteignent près de 8 cm

<u>Affinités</u> - L'organisation du corps de A. atavus est en tout point conforme à celle des Penaeidae actuels. Cette famille est généralement considérée comme un groupe primitif, proche de la souche des Décapodes (GLAESSNER, 1969 a).

<u>Ecologie</u> - Antrimpos fait partie du groupe des Natantia, c'est-à-dire des Décapodes nageurs. C'est une crevette au sens strict du terme. La plupart des formes fossiles proviennent de dépôts marins (VAN STRAELEN, 1925). A l'heure actuelle, certains Penaeidae peuplent les eaux douces ou saumâtres (BALSS, 1926).

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - A. atavus n'est connu que du Grès à Voltzia du Nord des Vosges.

Sous-ordre des Pleocyemata BURKENROAD, 1963 Infra-ordre des Astacidae Latreille, 1803 Famille des Erymidae Van Straelen, 1924 Sous-Famille des Clytiopsinae BEURLEN, 1927 Genre Clytiopsis BILL, 1914

> Clytiopsis argentoratensis BILL, 1914 Texte-fig, 12 et 13 pl, XII, fig. 4 ; pl. XIII, fig. 1 et 2

```
1914 - Clytiopsis argentoratense BILL, p. 298; pl. 10, fig. 1-2; pl. 11, fig. 1; pl. 12, fig. 1.
1914 - Clytiopsis elegans BILL, p. 300; pl. 10, fig. 3; pl. 11, fig. 2; pl. 13, fig. 2-3.
1965 - Clytiopsis argentoratense BILL - Gall et Fischer, p. 43; texte fig. 1-2; pl. 1et II.
1966 - Clytiopsis argentoratensis BILL - Förster, p. 83; texte-fig. 10; pl. 13, fig. 1-2.
<u>Matériel</u> - Collection Bill : un exemplaire (syntype)
Collections Grauvogel et Gall : une centaine d'exemplaires (CL)
```

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Arzviller (27), Bust (16), Gresswiller, Schoenbourg, Soultz-les-Bains, Vilsberg, Wasselonne - Grès argileux : Soultz-les-Bains



Figure 12 - Reconstitution de Clytiopsis argentoratensis BILL. Vue latérale (x 6) <u>Description</u> - Carapace céphalothoracique large, épaisse, à surface granuleuse. Elle est parcourue par un sillon médio-dorsal longitudinal qui représenterait la charnière vestigiale d'une carapace originellement bivalve (SECRÉTAN, 1964). Rostre court, triangulaire, bordé de chaque côté par une rangée de tubercules qui se poursuit sur la carapace. Une autre rangée de tubercules part de l'angle externe de chaque échancrure orbitraire. Les sillons céphalothoraciques sont bien développés (Fig. 13). Abdomen plus long que la carapace, composé de 6 segments à plèvres mucronées ; le segment antérieur est moins développé que les autres. Telson de forme ogivale, bordé de soies. Antennules courtes, biramées. Antennes comportant un long fouet multiarticulé et une écaille ovale garnie de soies. Les trois premières paires de pattes thoraciques portent des pinces ; la plus antérieure est la plus forte. Appendices abdominaux biramés. Uropodes foliacés parcourus par une carène médiane et bordés de soies ; exopodite articulé.

Dimensions : la longueur du corps (antennes non comprises) varie de 16 à 50 mm

<u>Affinités</u> - D'après FÖRSTER (1966), Clytiopsis se situerait sur un rameau latéral de la lignée des Erymidae. La distinction des deux espèces de Clytiopsis créées par BILL, C. argentoratense et C. elegans, fondée essentiellement sur la structure du telson, ne résiste pas à une étude biométrique (GALL et FISCHER, 1965) ; il s'agit d'une seule et même espèce. Il est probable que Galathea audax v. MEYER et Gebia obscura v. MEYER, provenant du Grès à Voltzia de Soultz-les-Bains (v. MEYER, 1834), représentent en réalité des formes juvéniles de Clytiopsis (FÖRSTER, 1967).

Ecologie - Clytiopsis fait partie du groupe des Reptantia, c'est-à-dire des Décapodes marcheurs. Ses appendices robustes facilitaient son déplacement sur le fond.

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - C. argentoratensis n'a été rencontré que dans le Grès à Voltzia du Nord des Vosges. Une espèce voisine, C. thuringica FÖRSTER, a été décrite dans le Keuper d'Allemagne (FÖRSTER, 1967).



CRUSTACÉS AUX AFFINITÉS INCERTAINES

SOUS-CLASSE DES HALICYNA GALL et GRAUVOGEL, 1967 Super-Famille des Cycloidea GLAESSNER, 1928 Famille des Halicynidae GALL et GRAUVOGEL, 1967 Genre Halicyne v. MEYER, 1844

> Halicyne ornata TRÜMPY, 1957 Texte-fig. 14 et 15 pl. XIV, XV et XVI, fig. 1 et 2

1957 -Halicyne ornata TRÜMPY, p. 544 ; fig. 1-2. 1967a-Halicyne ornata TRÜMPY - Gall et Grauvogel, p. 1 ; texte-fig. 1-3 ; pl. A-G.

<u>Matériel</u> - Collection Bill : un exemplaire Collections Grauvogel et Gall : une centaine d'exemplaires (H)

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Arzviller (27), Bust (17, 18), Cocheren, Gresswiller, Hangviller (21), Phalsbourg, Vilsberg

<u>Description</u> - Corps entièrement recouvert par un bouclier dorsal circulaire calcifié. Cette carapace est convexe, bordée par un limbe lisse. Sa partie centrale est occupée par un bourrelet axial d'où partent des séries de granules en disposition radiaire. La région antérieure porte 7 lobes en relief et deux échancrures orbitaires ; il s'y attache une plaque rostrale semi-circulaire et, ventralement, deux cornes frontales. Bord postérieur mucroné. Yeux composés pédonculés. Antennes inconnues. Cinq paires de pattes biramées ; endopodite robuste, épineux, terminé par une griffe pouvant se rabattre vers l'avant ; exopodite grêle, multiarticulé. Endosquelette segmenté. Deux cavités branchiales.

Dimensions : le diamètre moyen du bouclier est d'environ 17 mm ; certains exemplaires atteignent 30 mm.

<u>Affinités</u> - Parfois considéré comme un Mérostome (SCHMIDT, 1928), Halicyne est, grâce au matériel étudié ici, maintenant définitivement classé parmi les Crustacés. Il réunit effectivement des caractères de Crustacés (organisation des yeux et des appendices) et de Chélicérates (développement des cavités branchiales, géniculation de l'endopodite). Par la structure de la carapace, il est très proche du genre Cyclus du Carbonifère et du Permien. Dans l'état présent de nos connaissances, les Halicyna ne peuvent être rapprochés d'aucun groupe actuel ou fossile (GLAESSNER, 1969 b).

Ecologie - Halicyne est essentiellement connu des dépôts marins du Muschelkalk ou du Trias alpin. La conformation des appendices, qui rappelle celle des pattes ravisseuses des Insectes carnivores, évoque des moeurs prédatrices.

Répartition stratigraphique et géographique - Halicyne a été signalé dans le Trias d'Europe et d'Amérique. L'holotype de H. ornata provient du Muschelkalk moyen d'Allemagne.



Figure 14 - Reconstitution de Halicyne ornata TRÜMPY (x 4) A face dorsale B face ventrale (d'après GALL et GRAUVOGEL, 1967 a) Les structures dessinées en pointillés sont conjecturales.



Figure 15 - Coupe transversale interprétative à travers la carapace des Halicynés (d'après GALL et GRAUVOGEL, 1967 a)

SUPER-CLASSE DES MYRIAPODA LATREILLE, 1796 CLASSE DES DIPLOPODA GERVAIS, 1844 SOUS-CLASSE DES HELMINTHOMORPHA POCOCK, 1887 Ordre et Famille Incertains Genre Indéterminé Pl. XVII, fig. 1

Matériel - Collection Grauvogel : 11 exemplaires (MYR).

Gisements - Grès à meules : Bust (18), Hangviller (20).

<u>Description</u> - Corps allongé comportant une quarantaine de segments tous semblables. Chaque segment est divisé par un sillon transversal en prozonite et métazonite. Prozonite plux étroit que le métazonite et présentant des stries dorso-ventrales plus accentuées. Segments environ trois fois plus larges que hauts ; régions pleurales renforcées marginalement et séparées des tergites par un sillon, sauf dans la région postérieure du corps. Tête petite, semicirculaire, mal connue. Telson à bord postérieur arrondi. Deux paires de pattes par segment, terminées par une griffe. Sur quelques exemplaires on devine, au niveau des tergites, des baguettes obliques correspondant vraisemblablement aux apodèmes des appendices.

<u>Affinités</u> - L'organisation du corps des Myriapodes du Grès à Voltzia est celle des Diplopodes. La classification de ce groupe, essentiellement basée sur la structure des pièces buccales et de l'appareil génital, n'est pas utilisable dans le cas présent. Les formes étudiées rappellent le genre Pleurojulus FRITSCH du Permien de Tchécoslovaquie (MÜLLER, 1963, fig. 198).

Ecologie - Les Diplopodes sont des Arthropodes terrestres, essentiellement végétariens (DE- \overline{MANGE} , 1963).

SUPER-CLASSE DES HEXAPODES CLASSE DES INSECTES Pl. XVII, fig. 2-4

<u>Matériel</u> - Collection Bill : 3 échantillons (larves) Collections Grauvogel et Gall : plusieurs milliers d'exemplaires

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Bust (17, 18), Cocheren, Han - viller (20, 21), Marmoutier, Petersbach (9, 11), Phalsbourg, Soultz-les-Bains, Vilsberg, Wasselonne

Le matériel paléoentomologique du Grès à Voltzia comprend des ailes, des larves et des restes corporels. En raison de l'abondance et de la diversité des formes récoltées, leur étude a été différée. A l'heure actuelle, deux espèces seulement ont été décrites et figurées : un Protodonate, Triadotypus guillaumei GRAUVOGEL et LAURENTIAUX, libellule de 30 cm d'envergure (GRAUVOGEL et LAURENTIAUX, 1952) et un Paratrichoptère, Pseudodiptera gallica LAURENTIAUX et GRAUVOGEL (LAURENTIAUX, 1953).

Un examen préliminaire des Insectes du Grès à Voltzia (GRAUVOGEL, 1947 c ; LAUREN-TIAUX, 1953) a permis de reconnaître les groupes suivants :

Ephéméroptères avec de nombreuses larves aquatiques à 3 cerques, Odonatoptères (Protodonates) avec une libellule géante, Blattoptéroïdes avec des blattes entières et de très nombreuses ailes, Coléoptéroïdes avec de nombreuses élytres, Mécoptéroïdes avec des Diptères, des Paratrichoptères et quelques Permochoristides, Hémiptéroïdes avec des insectes entiers et de nombreuses ailes.

La faune palécentomologique du Grès à Voltzia traduirait un faciès tempéré chaud (LAU-RENTIAUX, 1953, p. 518).

EMBRANCHEMENT DES ÉCHINODERMES

CLASSE DES ÉCHINIDES

Ordre des CIDAROIDA CLAUS, 1880

Genre Cidaris LESKE, 1778

Cidaris cf. grandaeva GOLDFUSS

Pl. XVIII, fig. 1

1874 - Cidaris grandaevus GOLDF. - Quenstedt, p. 158; pl. 67, fig. 102-114. 1928 - Cidaris grandaeva GOLDF. - Schmidt, p. 134; texte-fig. 263.

Matériel - Collection Gall : nombreux fragments de radioles

Gisements - Grès argileux : Adamswiller (8), Hangviller (20), Petersbach (9)

<u>Description</u> - Radioles cylindriques, longs et minces de 0,5 à 1 mm de diamètre. Surface externe striée longitudinalement. La section transversale révèle une zone médullaire occupant environ un tiers du diamètre total et une zone corticale très développée, formée de travées radiales réunies par des trabécules.

<u>Affinités</u> - La structure interne des radioles est caractéristique des Cidaridés (HESSE, 1900), seul groupe d'Echinides présent au Trias inférieur et moyen. Elle est proche de celle de Radiolus lineola var. minor décrit par BATHER (1911) dans le Trias du lac Balaton. L'organisation de la thèque demeurant inconnue, l'attribution des radioles du Grès à Voltzia à l'espèce C. grandaeva reste provisoire -

Répartition statigraphique et géographique - C. grandaeva a été fréquemment décrit dans le Muschelkalk d'Europe.

CLASSE DES STELLÉROÏDES SOUS-CLASSE DES OPHIUROIDEA GRAY, 1840 Famille et Genre Indéterminés

Pl. XVIII, fig. 2

Matériel - Collection Gall : nombreuses vertèbres isolées

Gisement - Grès argileux : Hangviller (20)

<u>Description</u> - Petites vertèbres (1 mm de diamètre) de forme variable. Certaines d'entre elles montrent sur chacune de leurs faces articulaires une combinaison de trois saillies, caractéristiques du type vertébral zygospondyle (UBAGHS, 1953). Des éléments allongés en forme de cuillère pourraient correspondre à des pièces bursales.

Remarque - Des ophiures ont été signalés à plusieurs reprises dans le Trias germanique et le Trias alpin (KUTSCHER, 1940 ; HESS, 1965 ; LEONARDI, 1935, 1967). Les formes du Grès à Voltzia, isolées par tamisage, ne permettent guère de détermination plus précise.

ÉCHINODERMES INDÉTERMINÉS

Matériel - Collection Gall : nombreuses lames minces

<u>Gisements</u> - Grès argileux : Adamswiller (8), Arzviller (27), Hangviller (20), Petersbach (9), Soultz-les-Bains

<u>Description</u> - Les fragments de squelettes d'Echinodermes se reconnaissent facilement en plaques minces. Mais leur attribution à un groupe précis demeure délicate. Certains d'entre eux semblent appartenir à des Crinoides.

INTÉRÊT PALÉOÉCOLOGIQUE DES ÉCHINODERMES DU GRÈS À VOLTZIA

Organismes sténohalins, ne supportant pas les variations de concentration du milieu ambiant, les Echinodermes sont strictement marins.

EMBRANCHEMENT DES VERTÉBRÉS

SUPER-CLASSE DES POISSONS CLASSE DES OSTÉICHTHYENS SOUS-CLASSE DES ACTINOPTÉRYGIENS Super-ordre des CHONDROSTÉENS Ordre des SAURICHTHYIFORMES Genre Saurichthys Agassiz, 1833

Saurichthys daubreei FIRTION, 1934

1934 - Saurichthys daubreei FIRTION, p. 90 ; texte-fig. 1-3 ; pl. IX, fig. 1-2.

Matériel - Collection Bill : holotype (B 1).

Gisement - Grès à meules (?) : Wasselonne

Description - Corps mince et allongé. Tête grande, triangulaire, terminée par un long rostre. Opercule réniforme, strié. Nageoire caudale homocerque. Nageoires dorsale et anale opposées. Colonne vertébrale incomplètement ossifiée.

Dimensions : longueur totale du corps 57 mm, longueur du crâne 25 mm

Ecologie - Le genre Saurichthys est marin (FIRTION, 1934).

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - Saurichthys se rencontre dans le Trias d'Europe, d'Australie et de Madagascar (LEHMAN, 1966 a).

Chondrostéens Indéterminés

Pl. XIX, fig. 1 et 2

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une vingtaine d'exemplaires

Gisements - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Bust (17), Hangviller (20), Vilsberg

<u>Description</u> - Corps fusiforme dont la hauteur dorso-ventrale augmente considérablement chez les exemplaires de grande taille. Dents styliformes. Nageoires bordées de fulcres. Nageoire caudale hémihétérocerque, fourchue. Sur la ligne médio-dorsale, en avant de la nageoire dorsale, de fortes écailles faîtières simulent une deuxième nageoire dorsale. Ecailles lisses, rhombiques.

Dimensions : la longueur du corps varie de 3 à 7 cm, sa plus grande largeur de 1 à 3,5 cm

<u>Affinités</u> - Les données encore partielles sur l'anatomie de ces poissons montrent de grandes ressemblances avec le genre Praesemionotus décrit par JÖRG (1969) dans le Buntsandstein supérieur d'Allemagne. La forme générale du corps rappelle également Dipteronotus du Keuper de Grande Bretagne (EGERTON, 1854).

Super-ordre des HOLOSTÉENS Ordre des SÉMIONOTIFORMES Famille des Semionotidae Woodward, 1895 Genre Pericentrophorus Jörg, 1969

Pericentrophorus aff. minimus JÖRG, 1969 Texte-fig. 16 ; pl. XIX, fig. 3

1969 - Pericentrophorus minimus JÖRG, p. 94 ; texte-fig. 3-4 ; pl. III, fig. 1-3.

Matériel - Collection Grauvogel : une cinquantaine d'exemplaires (P)

Gisements - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Bust (17)

<u>Description</u> - Corps allongé présentant une légère dépression au niveau de la nageoire dorsale. Opercule large ; préopercule fortement incurvé. Maxillaire supérieur petit. Dents styliformes. Nageoires comportant 5 à 9 rayons. Nageoire caudale hétérocerque, non fourchue. Ligne médiodorsale à écailles faîtières petites. Ecailles lisses, rhombiques, devenant plus petites dans la région postérieure du corps et se résolvant en une seule rangée longitudinale dans le lobe supérieur de la nageoire caudale.

Dimensions : la longueur totale du corps varie de 2 à 7 cm



Figure 16 - Reconstitution de Pericentrophorus minimus JÖRG. (d'après JÖRG, 1969)

Remarques - L'organisation générale du corps est conforme à celle du genre Pericentrophorus JÖRG et aux Sémionotidés en général (LEHMAN, 1966). Les exemplaires du Grès à Voltzia n'ont pas permis de reconstituer l'anatomie des os du crâne et ne peuvent être attribués avec certitude à P. minimus. Le corps de beaucoup d'échantillons est incomplètement recouvert d'écailles, laissant alors apparaître la partie postérieure de la colonne vertébrale. Vers la région caudale, les apophyses neurales augmentent de taille, tandis que les apophyses hémales régressent. D'autres échantillons montrent le remplissage du tube digestif modelé par la valvule spirale.

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - Pericentrophorus a uniquement été décrit du Buntsandstein supérieur d'Allemagne (JÓRG, 1969)

SOUS-CLASSE DES CROSSOPTÉRYGIENS Ordre des COELACANTHIFORMES Famille des Coelacanthidae Huxiey, 1861 Genre Indéterminé

Pl. XVIII, fig. 3; pl. XIX, fig. 4

<u>Matériel</u> - Collection Grauvogel : deux exemplaires entiers (P1, P2) et de nombreuses écailles isolées

Gisement - Grès à meules : Arzviller (27), Vilsberg

<u>Description</u> - Corps trapu à deux nageoires dorsales. Nageoire caudale très développée et symétrique (diphycerque), terminée par un lobe axial. Ecailles ovoïdes, striées ; leur partie libre est ornée de rides.

Dimensions : longueur totale du corps : 12 cm ; longueur d'une écaille 3 mm

 $\underline{\text{Ecologie}}$ - Les Coelacanthiformes fossiles ont peuplé à la fois la mer et les eaux douces (LEHMAN, 1966).

Répartition stratigraphique et géographique - Connus depuis le Dévonien, les Coelacanthidés sont particulièrement abondants dans les gisements triasiques du monde entier.

DENTS RAPPORTÉES À DES POISSONS

Pl. XVIII, fig. 4

Matériel - Collection Gall : une dizaine d'échantillons

Gisement - Grès argileux : Hangviller (20, 21)

<u>Description</u> - Dents coniques de 1 à 3 mm de long, parfois striées longitudinalement, sauf dans la région distale.

Affinités - Par leur aspect et leur petite taille, certains exemplaires rappellent les dents de Saurichthys (SCHMIDT, 1928).

SUPER-CLASSE DES TÉTRAPODES

CLASSE DES AMPHIBIENS

SOUS-CLASSE DES STÉGOCEPHALES

Super-ordre des LABYRINTHODONTIA OWEN, 1845 Ordre des TEMNOSPONDYLI ZITTEL, 1887 Sous-ordre des Stereospondyli ZITTEL, 1887 Super-Famille des Capitosauroidea SÄVE-SÖDERBERGH, 1935 Famille des Capitosauridae WATSON, 1919 Genre Odontosaurus v. MEYER, 1836

Odontosaurus voltzii v. MEYER, 1836

1836 - Odontosaurus voltzii MEYER, p. 3; pl. I, fig. 1 a-d. <u>Matériel</u> - Collection H.v. Meyer : holotype <u>Gisement</u> - Grès à meules : Soultz-les-Bains

Description - Demi-mâchoire supérieure portant, dans une dépression, une cinquantaine de dents. Dents cylindríques, légèrement incurvées, à rainures longitudinales.

Remarque - Telle qu'elle résulte de la description donnée par v. MEYER (1836), la diagnose de Odontosaurus est très succincte. Il est probable qu'une révision de ce genre permettra d'y rapporter un certain nombre de fragments de mâchoires encore indéterminés, récoltés dans le Grès à meules du Nord des Vosges (Pl. XX, fig. 3).

Genre Indéterminé

Pl. XX, fig. 1

Matériel - Collection Grauvogel : un crâne presque complet

Gisement - Grès à meules : Graufthal

Description - Crâne à contour triangulaire et à museau très allongé. Echancrure optique complètement fermée. Orbites situées dans la région postérieure du crâne. Sutures osseuses et sillons sensoriels peu visibles. Dents petites et pointues.

Dimensions : longueur du crâne 25 cm, largeur dans la région postérieure, environ 17 cm, hauteur dans la région postérieure 3,1 cm

<u>Affinités</u> - Par sa configuration générale, ce crâne est proche de celui de deux autres Stégocéphales récemment décrits dans le Buntsandstein supérieur, Stenotosaurus lehmani HEYLER (1969) du Grès à Voltzia des Vosges méridionales et Eocyclotosaurus woschmidti ORTLAM (1970) du Röt de la Forêt Noire.

FRAGMENTS D'OS ATTRIBUÉS À DES STÉGOCÉPHALES

Pl. XX, fig. 2

Dans le Grès à Voltzia se récoltent de nombreux fragments d'os, vertèbres, mâchoires, côtes, os des membres ... Certains d'entre eux présentent de profondes sculptures caractéristiques des Stégocéphales. Un tel échantillon a été rapporté par FIRTION (1936) à Mastodonsaurus vaslenensis MEYER.

INTÉRÊT PALÉOÉCOLOGIQUE DES AMPHIBIENS DU GRÈS À VOLTZIA

La vie larvaire des Amphibiens se déroulant nécessairement dans les eaux douces, la présence de Stégocéphales indique la proximité de terres émergées.

CLASSE DES REPTILES

Genre Indéterminé

Matériel - Collection Grauvogel : un exemplaire

Gisement - Grès à meules : Cocheren

<u>Description</u> - Squelette axial allongé comportant au moins une cinquantaine de vertèbres. Une vingtaine de côtes grêles et arquées sont visibles. Fémur court et massif. Crâne et membres inconnus.

Dimensions : longueur de l'échantillon incomplet 10 cm, longueur des côtes 13 mm, longueur du fémur 10 mm

 $\frac{Remarque}{fossile}$ - Mises à part les empreintes de pas attribuées à des Reptiles, il s'agit de l'unique fossile corporel de cette classe reconnu dans le Grès à Voltzia.

CHAPITRE 2

LES TÉMOINS DE L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE

Les témoins de l'activité biologique concernent les vestiges des diverses manifestations de la vie, comme la reproduction (oeufs et pontes), la nutrition (coprolithes, diverses traces), la locomotion (pistes) ou l'habitat (terriers), à l'exclusion des fossiles corporels. Ils ne se rencontrent qu'exceptionnellement en connexion avec les organismes qui en sont responsables. Aussi leurs affinités systématiques demeurent-elles le plus souvent hypothétiques. Malgré cette difficulté, il s'est avéré commode, dans certains cas, de faire appel à la nomenclature binaire pour désigner ces restes fossiles (HÄNTZSCHEL, 1962).

I. LES PONTES ET LES OEUFS

1. PONTES RAPPORTÉES À DES INSECTES

Genre Monilipartus GALL et GRAUVOGEL, 1966

Monilipartus tenuis GALL et GRAUVOGEL, 1966 Texte-fig. 17 ; pi. XXI, fig. 1-3

1966 - Monilipartus tenuis GALL et GRAUVOGEL, p. 156 ; texte-fig. 1 ; pl. A, fig. 1-3 ; pl. C, fig. 2.

Matériel - Collection Grauvogel : holotype (PC 12) et plusieurs centaines d'exemplaires (PC)

Gisements - Grès à meules : Arzviller (27), Vilsberg

 $\underline{\text{Description}}$ - Pontes comportant jusqu'à 3000 oeufs ovales, disposés comme les grains d'un chapelet dans une gaine de mucilage. Des structures visibles dans les oeufs semblent être en relation avec le développement de l'embryon. Eclosion suivant une déchirure méridienne.

Dimensions : la plus grande dimension de la ponte peut atteindre 4 cm ; le grand axe des oeufs mesure 0,25 mm ; le rapport largeur/longueur des oeufs est proche de 7/9

Interprétation - M. tenuis rappelle les pontes de certains Chironomides actuels (MUNSTERHJELM, 1920).

65



Figure 17 - Oeufs de Monilipartus tenuis GALL et GRAUV. (x 100) révélant des structures internes en relation avec le développement des embryons (d'après GALL et GRAUVOGEL, 1966)

Genre Clavapartus GALL et GRAUVOGEL, 1966

Clavapartus latus GALL et GRAUVOGEL, 1966 Pl. XXII, fig. 1-2

1966 - Clavapartus latus GALL et GRAUVOGEL, p. 157 ; pl. B, fig. 1-2 ; pl. C, fig. 1. <u>Matériel</u> - Collections Grauvogel et Gall : holotype (PM 149) et quelques centaines d'exemplaires (PM)

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Bust (17, 18), Petersbach (11), Vilsberg

<u>Description</u> - Pontes en forme de massue renflée à une extrémité, renfermant 500 à 2500 oeufs ovales. Oeufs parfois épigénisés en apatite. Eclosion suivant une fente longitudinale.

Dimensions : la longueur de la ponte varie de 20 à 30 mm pour une largeur moyenne de 5 mm ; la grande dimension des oeufs est d'environ 0,30 mm, la largeur de 0,20 mm

<u>Interprétation</u> - C. latus ressemble à certaines pontes de Chironomides et à des pontes de Trichoptères (SÉGUY, 1950 ; BERTRAND, 1954 ; THIENEMANN, 1954 ; CHOPARD, 1963).

Genre Furcapartus GALL et GRAUVOGEL, 1966

Furcapartus exilis GALL et GRAUVOGEL, 1966 Pl. XXIII, fig. 1-2

1966 - Furcapartus exilis GALL et GRAUVOGEL, p. 158 ; pl. D, fig. 1-2.

Matériel - Collection Grauvogel : holotype (PV 19) et une vingtaine d'exemplaires (PV)

Gisements - Grès à meules : Arzviller (27), Schoenbourg

Description - Pontes en forme de V comportant un millier d'oeufs sphériques.

Dimensions : la longueur moyenne d'une branche de la ponte est de 15 mm pour une largeur de 1,5 mm ; le diamètre des oeufs est de 0,18 mm

Interprétation - F. exilis évoque également les pontes des Diptères et des Trichoptères actuels.

INTÉRÊT PALÉOÉCOLOGIQUE DES PONTES D'INSECTES DU GRÈS À VOLTZIA

La ponte des Insectes à larves aquatiques est liée à l'existence d'une faible tranche d'eau. La présence d'une gaine mucilagineuse peut alors s'interpréter comme un dispositif protégeant les oeufs contre la dessication. Les insectes aquatiques ne peuplent pas uniquement les eaux douces. En effet, sur les bords de la mer Baltique, les larves de Diptères sont localisées dans des domaines où la salinité est comprise entre $3^{\circ}/_{\circ\circ}$ et $18^{\circ}/_{\circ\circ}$ (REMANE, 1958). Tout laisse supposer qu'au Trias de telles marges de tolérance existaient déjà.

2. PONTES DE CRUSTACÉS (Pl. XXIV, fig. 1-2)

Dans le chapitre précédent (p. 41) furent signalés des oeufs sphériques situés à l'intérieur des valves d'esthéries. En particulier, chez Palaeolimnadia alsatica REIBLE se rencontrent deux catégories d'oeufs : des oeufs peu nombreux (30 à 100), de taille appréciable (0,10 à 0,13 mm) et des oeufs nettement plus petits (0,020 à 0,075 mm) en nombre plus élevé (200 à 500). Ces deux types de pontes, qui ne se trouvent qu'exceptionnellement réunis dans une même carapace, peuvent être interprétés, les premiers comme des oeufs de durée qui se développent lorsque les conditions d'existence deviennent défavorables et qui sont facilement disséminés par le vent (DECHASEAUX, 1951), les seconds comme des oeufs à développement immédiat qui assurent la pérennité de l'espèce au sein du milieu (GALL et GRAUVOGEL, 1966).

3. OEUFS ET PONTES RAPPORTÉS À DES POISSONS

Genre Palaeoxyris BRONGNIART, 1828

Palaeoxyris regularis BRONGNIART, 1828

Pl. XXV, fig. 1

1844 - Palaeoxyris regularis BRONG. - Schimper et Mougeot, p. 47 ; pl. 23, fig. 3. 1928 - Spirangium regulare Schimp. - Schmidt, p. 47 ; texte-fig. 2.

<u>Matériel</u> - Collection Schimper et Mougeot : holotype Collections Grauvogel et Gall : une centaine d'exemplaires (PX)

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Adamswiller (7), Arzviller (27), Bust (17, 18), Cocheren, Marmoutier, Petersbach (9, 11), Phalsbourg, Soultz-les-Bains, Vilsberg

<u>Description</u> - Coque fusiforme constituée par deux valves accolées et enroulées en hélice. Chaque extrémité est prolongée par une expansion servant à la fixation. Des crêtes longitudinales délimitent des secteurs losangiques à la surface de l'oeuf. Certains exemplaires sont groupés en faisceau. D'autres présentent un corps central correspondant à l'embryon.

Dimensions : la longueur totale des oeufs varie de 6 à 18 cm, leur largeur de 1 à 2,5 cm

<u>Affinités</u> – Initialement rapportés à des organes végétaux, les Palaeoxyris sont maintenant considérés comme des oeufs de Sélaciens (PRUVOST, 1919). Les exemplaires du Grès à Voltzia montrent des fluctuations notables de la taille, mails il ne semble pas qu'il faille leur attribuer une valeur spécifique. <u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - P. regularis n'est connu que du Buntsandstein supérieur des Vosges.

Pontes à oeufs auréolés

Pl. XXV, fig. 2

1947 d - Oeufs à auréole individuelle : Grauvogel, p. 1165 1951 b - Pontes de poissons - Grauvogel, p. 152.

Matériel - Collection Grauvogel : une cinquantaine d'exemplaires

Gisements - Grès à meules : Arzviller (27), Bust (17), Vilsberg

<u>Description</u> - Pontes de contour irrégulier pouvant renfermer plusieurs milliers d'oeufs. Oeufs sphériques de 0,20 à 0,25 mm de diamètre, entourés par une auréole claire correspondant à une enveloppe mucilagineuse.

Dimensions : le diamètre apparent des pontes varie de 4 à 20 cm

Interprétation - Ces pontes ont été trouvées associées à des Poissons Actinoptérygiens (GRAUVOGEL, 1951 b).

II. LES COPROLITHES

Certaines concentrations anormalement élevées de fragments d'organismes peuvent être interprétées comme des coprolithes ou comme des pelotes de régurgitation. Il en est ainsi d'amas sans forme définie, de quelques centimètres de longueur, constitués par des centaines de valves d'esthéries mélées à des fragments d'autres Crustacés. D'après leur taille, on peut les attribuer à des poissons ou à des amphibiens.

III. LES TRACES D'ACTIVITÉ ANIMALE (LEBENSSPUREN)

La science des traces fossiles ou ichnologie a connu, au cours des dernières décennies, un essor remarquable (RICHTER, 1924, 1926, 1928; ABEL, 1935; SEILACHER, 1953, 1954 a, 1960, 1963; LESSERTISSEUR, 1955; HÄNTZSCHEL, 1955, 1962, 1965). Son développement est la conséquence de l'effort important accompli pour interpréter les conditions de dépôt des séries sédimentaires azoïques ou pauvres en fossiles comme, par exemple, les flyschs. En effet, traces d'activité et fossiles corporels semblent s'exclure mutuellement. Un sédiment à traces abondantes sera généralement pauvre en fossiles, tandis qu'un niveau très fossilifère ne livrera que peu de traces.

La morphologie des pistes et des terriers fournit des renseignements sur le comportement éthologique de leurs auteurs. Celui-ci est, dans une large mesure, contrôlé par les caractères du milieu ambiant : bathymétrie, aération des eaux, intensité des courants, valeur du taux de sédimentation, etc. Correctement interprétées, les traces fossiles d'activité animale deviendraient, dans certaines limites, des guides pour reconstituer les conditions de l'environnement. Cet aspect a été plus particulièrement développé par SEILACHER (1953 b, 1964) qui distingue trois ichnofaciès de distribution universelle, correspondant à autant d'associations de traces : le faciès à Nereites, le faciès à Zoophycos et le faciès à Cruziana. Dans la plupart des cas, les organismes responsables des traces fossiles sont inconnus. Aussi une attention toute particulière a-t-elle été apportée à l'observation et à l'étude expérimentale des traces actuelles. Dans cette voie s'est illustrée l'école de l'Institut de Recherches Senckenberg de Wilhelmshaven établi sur les rives de la mer du Nord (SCHÄFER, 1962). L'ichnologie n'obéit pas aux règles des nomenclatures classiques. En effet, un même type de trace a pu être occasionné par des animaux appartenant à des groupes zoologiques différents. Inversement, en réponse à des variations de l'environnement, un organisme donné peut produire des traces très diverses. La nomenclature ichnologique n'exprime que des comportements éthologiques. C'est pourquoi seules les dénominations génériques seront retenues ici.

1. LES TRACES D'HABITAT (Domichnia; SEILACHER, 1953 a)

Genre Rhizocorallium ZENKER, 1836

Variété Glossifungites LOMNICKI, 1886

Texte-fig. 18; pl. XXV, fig. 3-4

1926 - Rhizocorallium jenense ZENK. - Richter, p. 200; pl. 3, fig. 1-2. 1959 - Rhizocorallium jenense ZENK. - Muller, p. 239; texte-fig. 1-4; pl. I, fig. 1-2. 1963 - Rhizocorallium commune SCHMID - v. Freyberg, p. 22; fig. 1-2.

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une centaine d'exemplaires

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Arzviller (27), Bust (16), Vilsberg Grès argileux : Adamswiller (8), Arzviller (27), Bust, (16), Soultz-les-Bains, Wasselonne

<u>Description</u> - Terrier en forme de U situé dans un plan oblique par rapport au litage du sédiment. Les deux branches du tube sont réunies par de minces traverses ("Sprcitc" des auteurs allemands) parallèles entre elles et à l'arc inférieur de l'U. Ces traverses correspondent aux positions successives de l'arc inférieur au cours de l'agrandissement de la galerie. Le diamètre et l'écartement des deux branches du terrier sont maximum dans la région la plus éloignée des embouchures. Un exemplaire renferme de petits corps ovoïdes attribuables à des coprolithes.

Dimensions : la longueur des branches est de 5 à 10 cm, leur écartement varie de 1 à 2 cm et la largeur du tube de 3 à 7 mm

<u>Affinités</u> - L'organisation des terriers en U du Grès à Voltzia est identique à celle des formes décrites sous le nom de R. jenense ZENK. ou R. commune SCHMID. Attribuer un nom spécifique à ces traces est illusoire, car on sait combien variables peuvent être les aspects des galeries creusées par un même animal selon la nature et la consistance du sédiment (LESSERTIS-SEUR, 1955, fig. 1A). L'augmentation du diamètre des tubes et de l'écartement des branches vers l'arc inférieur sont caractéristiques de la variété Glossifungites (SEILACHER, 1967).

<u>Ecologie</u> - SEILACHER (1967) a étudié les variations morphologiques des terriers en U pourvus de traverses en fonction de la bathymétrie des dépôts et a montré leur relation avec l'éthologie de leurs auteurs. Dans les zones peu profondes où la sédimentation est faible ou nulle et le substratum légèrement induré, l'animal modifie uniquement son terrier par suite de sa croissance : il l'approfondit et augmente le diamètre du tube et l'écartement entre les deux branches. L'occupant, probablement un Crustacé, se nourrit en captant les particules nutritives en suspension dans l'eau. Ce type de terrier caractérise l'ichnofaciès à Glossifungites. Il se distingue des terriers de l'ichnofaciès à Skolithos où les nombreuses traverses constituent une réponse à un taux de sédimentation élevé. Dans le faciès à Cruziana, plus profond, les animaux sont limivores. Les terriers sont alors plus complexes et plus grands car ils résultent du remaniement d'un important volume de sédiment.

Dans le Grès à Voltzia, seul l'ichnofaciès à Glossifungites a été rencontré. Il semble lié à des eaux marines (SEILACHER, 1964).

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - Rhizocorallium est un genre cosmopolite connu depuis le Cambrien jusqu'à l'ère tertiaire (HÄNTZSCHEL, 1962).



Figure 18 - Structure du terrier de Rhizocorallium var. Glossifungites.

Les terriers de lingules

Pl. XXVII, fig. 1-2

Matériel - Collection Gall : une centaine d'exemplaires

Gisements - Grès argileux : Bust (16), Hangviller (21)

<u>Description</u> - Terriers simples, disposés verticalement par rapport au litage de la roche, de 4 a 6 cm de longueur pour une largeur de plusieurs millimètres. Embouchure déprimée, subcirculaire, d'environ 8 mm de diamètre. L'extrémité inférieure du terrier forme, dans le niveau argileux sous-jacent, une excroissance conique ou cylindrique qui évoque les traces décrites par LINCK (1948, 1961) sous le nom de Cylindricum. Les coquilles aux deux valves réunies de Lingula tenuissima Bronn se trouvent in situ près du sommet du terrier.

<u>Ecologie</u> - Les indications écologiques fournies par les lingules ont déjà été discutées à propos de L. tenuissima. (p. 24). Ces organismes peuplent, depuis l'ère primaire, la zone de balancement des marées où ils supportent de fortes variations de l'oxygénation et de la salinité des eaux. Certains niveaux renferment des centaines de terriers espacés de 1 à 2 cm.

Répartition stratigraphique et géographique - Les terriers de lingules étaient essentiellement connus, jusqu'à présent, de l'ère primaire (PAINE, 1970). C'est la première fois qu'ils sont rencontrés dans le Trias.

2. LES TRACES DE LOCOMOTION (Repichnia SEILACHER, 1953 a)

A - TRACES D'ORGANISMES AQUATIQUES

Genre Isopodichnus BORNEMANN, 1889

Pl. XXVII, fig, 3

1928 - Isopodichnus problematicus SCHINDEWOLF, p. 27; fig. 6-10. 1960 - Isopodichnus problematicus SCHINDEWOLF - Seilacher, p. 43; pl. I, fig. 2

Matériel - Collection Grauvogel : une dizaine de dalles

Gisement - Grès à meules : Vilsberg

Description - Petites empreintes en relief au mur des bancs, constituées par deux cordons séparés par un sillon médian. Trace parfois réduite à la forme d'un grain de café (assimilé au genre Cruziana D'ORBIGNY par SEILACHER, 1954 a). La surface des cordons présente de fines stries disposées obliquement par rapport au sillon médian.

Dimensions : largeur de la piste 1 à 6 mm ; longueur variable

Interprétation - Isopodichnus a été considéré comme une piste d'Annélide (SCHINDEWOLF, 1928) ou de Crustacé (SEILACHER, 1954 a) ou même de Gastéropode (LINCK, 1942).

Répartition stratigraphique et géographique - Isopodichnus a été signalé à l'ère primaire et au Trias en Europe, en Amérique du Nord et en Australie (HÄNTZSCHEL, 1962)

Genre Kouphichnium NOPCSA, 1923

Pl. XXVI, fig. 1

1943 - Limuludichnulus nagoldensis LINCK, p. 10 ; texte-fig. 1 ; pl. I, fig. 1-3 ; pl. II, fig. 1. 1948 - Limuludichnulus gracilis LINCK, p. 57 ; texte-fig. 4 ; pl. VI ; pl. VII, fig. 2.

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une dizaine de dalles

<u>Gisements</u> - Grès à meules : Cocheren, Hangviller (21), Vilsberg Grès argileux : Adamswiller (8), Phalsbourg

Description - Pistes comportant deux séries longitudinales d'empreintes digitées. Chaque empreinte est formée de 2 à 5 rayons. Il peut exister, à l'échelle de la piste, une trace médiane linéaire et des rangées longitudinales d'empreintes supplémentaires.

Dimensions : la longueur des empreintes élémentaires varie de 1 à 2 cm ; leur écartement transversal est de 5 à 12 cm. La piste se poursuit parfois sur plusieurs mètres.

<u>Interprétation</u> - Kouphichnium est considéré comme une piste de Limulidé (HÄNTZSCHEL, 1962). Les empreintes pentadactyles seraient dues aux éperons tarsaux de la cinquième patte ambulatoire (LINCK, 1943, 1948; LESSERTISSEUR, 1955); la trace linéaire serait celle du telson. Les limules du Grès à Voltzia (p. 35) étant de taille moyenne, il faut supposer la présence d'exemplaires géants pour expliquer certaines grandes pistes, ou admettre l'existence d'organismes encore inconnus.

<u>Répartition stratigraphique et géographique</u> - Les pistes rapportées au genre Kouphichnium sont connues du Dévonien au Jurassique.

Empreintes pectinées

Pl. XXVI, fig. 2

pars 1948 - Ichnyspica pectinata LINCK, p. 32; pl. II, fig. 2 1956 - Drift-Marken - LINCK, p. 39; pl. 2, fig. 8-9

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : nombreux exemplaires

Gisements - Grès à meules : Adamswiller (8), Lohr (13), Petersbach (9), Schoenbourg

<u>Description</u> - Traces en relief au mur des bancs, ayant l'aspect d'un peigne parfois légèrement arqué. Elles comportent 6 à 7 "dents" de longueurs inégales, équidistantes les unes des autres, renflées à la base et s'effilant vers les extrémités.

Dimensions : la longueur du peigne est de 2 à 4 cm, celle des dents varie de quelques millimètres à plusieurs centimètres selon l'importance du glissement effectué sur le substratum par l'agent responsable de l'empreinte

<u>Interprétation</u> - D'après LINCK (1956), la plupart des empreintes pectinées sont des traces produites par le contact avec un substrat meuble de fragments d'Equisétales entraînés par les eaux. Mais cet auteur n'exclut pas l'éventualité d'une origine animale : certaines empreintes auraient été provoquées par des poissons dont la nageoire s'est imprimée dans la vase au cours du déplacement.

B - TRACES DE VERTÉBRÉS TÉTRAPODES

Genre Rhynchosauroides BEASLEY, 1911

Rhynchosauroides sp.

Pl. XXVI, fig. 3

1966 - Rhynchosauroides petri DEMATHIEU, p. 483; texte-fig. 1
1968 - Rhynchosauroides petri DEMATHIEU - Courel, Demathieu et Buffard, p. 279; pl. XVII, fig. 5

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une dalle portant une douzaine d'empreintes

Gisement - Grès argileux : Bust (16)

Description - Empreintes comportant les traces de 4 doigts fins, divergents, légèrement arqués et diminuant de taille vers l'intérieur. Main plus petite que les pieds et à doigts plus courts.

Dimensions : largeur de la plante du pied 35 mm, longueur du plus grand doigt du pied 65 mm, largeur de la paume de la main 30 mm, longueur du plus grand doigt de la main 50 mm

<u>Affinités</u> – Rhynchosauroides est une empreinte du groupe lacertoïde attribuée à un Reptile. Elle est proche de R. petri, mais en diffère par une taille plus grande.

Répartition stratigraphique et géographique – Les empreintes du type Rhynchosauroides ont été décrites, sous des noms variés, dans le Trias d'Europe et d'Amérique du Nord (HAUBOLD, 1966 a).

Empreintes "chirothérioïdes"

Pl. XXVI, fig. 4

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : une trentaine d'empreintes

72

Gisements - Grès à meules : Bust (18), Hangviller (21), Lohr (13), Petersbach (9)

<u>Description</u> - Empreintes comportant les traces de 3 doigts courts et trapus, munis de griffes. La largeur de l'empreinte varie de 5 à 11 cm. Imprimées dans un substratum mou et épais, la plupart des empreintes sont déformées par le glissement de l'animal sur le sol et par la compaction du sédiment. Dans de rares cas où il n'y a pas eu déformation, les traces ont été abîmées par les travaux d'exploitation.

<u>Affinités</u> - Il est vraisemblable que certaines empreintes incomplètes proviennent en réalité d'une patte pentadactyle et sont à rapprocher du genre Chirotherium si commun dans le Trias (SOERGEL, 1925 ; HAUBOLD, 1966 b). Une tendance vers la tridactylie se manifeste d'ailleurs dans ce groupe des Pseudosuchiens dès le début de l'ère secondaire (COUREL, DEMATHIEU et BUFFARD, 1968). D'autres empreintes évoquent le genre Coelurosaurichnus v. HUENE (SARJEANT, 1967).

3. LES TRACES DE NUTRITION (Fodinichnia SEILACHER, 1953 a)

Genre Planolites NICHOLSON, 1837

Pl. XXVIII, fig. 1-2

1937 - Planolites montanus RICHTER, p. 151 ; fig. 1-5.

Matériel - Collections Grauvogel et Gall : nombreux échantillons

Gisements - Grès à meules : Bust (18)

Grès argileux : Arzviller (27), Bust (16), Hangviller (20), Soultz-les-Bains

<u>Description</u> - Galeries linéaires simples à parcours vertical, oblique ou horizontal. Dans les grès elles se reconnaissent facilement grâce à la perturbation intervenue dans l'orientation des micas. Dans les sédiments argileux, leur trajet est marqué par une différence de texture ou de couleur de la roche.

Dimensions : le diamètre des terriers est de quelques millimètres

Interprétation - Planolites serait l'oeuvre d'organismes limivores, vraisemblablement d'Annélides, qui obstruent les terriers après leur passage.

Genre Taenidium HEER, 1877

1961 - Taenidium sp. - Linck, p. 6; pl. 2, fig. 1

Matériel - Collection Grauvogel : une douzaine de dalles

Gisement - Grès à meules : Bust (16)

Description - Galeries ramifiées, cylindriques dont le trajet comporte des ébauches de constrictions.

Dimensions : la largeur des galeries est d'environ 1,5 mm

<u>Affinités</u> - Les terriers du genre Taenidium sont l'oeuvre d'organismes fouisseurs (annélides ou larves d'insectes), probablement limivores, qui colmataient leurs galeries au cours de leur déplacement (WILCKENS, 1947; LINCK, 1961). Chez les formes du Grès à Voltzia, les constrictions des galeries sont très estompées, annonçant l'organisation des Chondrites.

Répartition stratigraphique et géographique - Les galeries rapportées au genre Taenidium sont fréquentes depuis l'ère primaire jusqu'à l'ère tertiaire (HANTZSCHEL, 1962).

Un certain nombre de traces du Grès à Voltzia, surtout du Grès argileux, restent difficiles à classer. Il s'agit de traces de fouissement occasionnées par des organismes divers (annélides, mollusques, arthropodes). Leur densité peut provoquer une véritable bioturbation du sédiment (Pl. XXVII, fig. 4).

CHAPITRE 3

LA FLORE DU GRÈS À VOLTZIA

Bien plus que la faune, c'est la flore qui, à l'origine, contribua à la célébrité du Grès à Voltzia. Des milliers d'échantillons y furent récoltés (SCHIMPER et MOUGEOT, 1844 ; FIRTION, 1936 ; GRAUVOGEL, 1947 b). Dans le Nord des Vosges, ils proviennent, sauf exception, du Grès à meules.

La pauvreté en espèces et le caractère xéromorphe de certaines plantes évoquent la végétation des régions arides et des sols riches en sels (FRENTZEN, 1920 ; MÄGDEFRAU, 1956). D'après leur taille, les végétaux du Grès à Voltzia formaient davantage des buissons que de véritables arbres. Les Conifères en constituent l'un des groupes dominants et annoncent l'épanouissement des Gymnospermes qui se produira au Jurassique. Cependant certains éléments se rattachent encore aux flores de l'ère primaire : Schizoneura est une forme permo-carbonifère tandis que Voltzia apparaît déjà au Permien (DEPAPE et DOUBINGER, 1963).

Une révision du matériel palynologique et paléobotanique du Grès à Voltzia est actuellement en cours par les soins de Mme L. STAMM-GRAUVOGEL à la suite de travaux récents (GRAUVO-GEL, DOUBINGER et GRAUVOGEL, 1967 ; ADLOFF et DOUBINGER, 1969 ; GRAUVOGEL-STAMM, 1969). Elle remet en question la définition et les affinités systématiques de bien des espèces. Les résultats de ces travaux n'étant pas encore tous publiés, il ne sera donné ici qu'une énumération succincte des principales formes récoltées. La classification adoptée est celle proposée par EM-BERGER (1968).

I. INVENTAIRE PALYNOLOGIQUE (ADLOFF et DOUBINGER, 1969)

1, LES SPORES

Division Triletes Potonié et KREMP, 1954

Subdivision Azonotriletes LUBER, 1935

Retusotriletes mesozoicus KLAUS, 1960 Calamospora keuperiana MÄDLER, 1964 Duplicisporites granulatus LESCHIK, 1955 Cyclogranisporites cf. congestus Leschik, 1955 Verrucosisporites applanatus MÄDLER, 1964 Verrucosisporites remyanus MÄDLER, 1964 Verrucosisporites cf. contactus CLARKE, 1965 Osmundacidites senectus BALME, 1963 Microreticulatisporites galli ADLOFF et DOUBINGER, 1969

75

2. LES POLLENS

Division Saccites ERDTMAN, 1947

Subdivision Polysaccites COOKSON, 1947

Hexasaccites muelleri REINHARDT et SCHMITZ, 1965 Subdivision Disaccites COOKSON, 1947 Illinites chitonoides KLAUS, 1964 Illinites kosankei KLAUS, 1964 Triadispora falcata KLAUS, 1964 Triadispora plicata KLAUS, 1964 Triadispora staplini KLAUS, 1964 Triadispora sp. (ADLOFF et DOUBINGER, 1969) Angustisulcites klausii FREUDENTHAL, 1964 Alisporites circulicorpus CLARKE, 1965 Alisporites grauvogeli KLAUS, 1964 Alisporites toralis CLARKE, 1965 Microcachryidites fastidioides KLAUS, 1964 Voltziaceaesporites heteromorpha KLAUS, 1964

Division Plicates POTONIÉ, 1960

Subdivision Monocolpates IVERSEN et TROELS-SMITH, 1950

Cycadopites carpentieri (DELCOURT et SPRUMONT, 19: Cycadopites subgranulosus CLARKE, 1965 Camerosporites secatus LESCHIK, 1955

3. LES ACRITARCHES

Sous-groupe des Sphaeromorphitae DOWNIE, EVITT et SARJEANT, 1963

Sous-groupe des Acanthomorphitae	DOW	'NI	E, EVITT	et	SARJEANT,	1963
Leiosphaeridia	sp.	3 (ADLOFF	et	DOUBINGER,	196 9)
Leiosphaeridia	sp.	2 (ADLOFF	et	DOUBINGER,	1969)
Leiosphaeridia	sp.	1 (ADLOFF	et	DOUBINGER,	1969)

Micrhystridium sp. (ADLOFF et DOUBINGER, 1969)

II. LES APPAREILS VÉGÉTATIFS

EMBRANCHEMENT DES CRYPTOGAMES VASCULAIRES

CLASSE DES LYCOPODIINÉES

Ordre des PLEUROMÉIALES

Famille des Pleuroméiacées

Pleuromeia sp.

CLASSE DES ARTICULÉES

Ordre des ÉQUISÉTALES

Famille des Schizoneuracées (PL XXIX, fig. 3) Schizoneura paradoxa SCHIMPER et MOUGEOT, 1844 Famille des Equisétacées (PL XXIX, fig. 4)

Equisetites mougcoti (BRONGNIART, 1828) Equisetites sp.

Rhizomes d'Equisétales indéterminées (GALL et GRAUVOGEL, 1967 c)

```
CLASSE DES FILICINÉES (Pl. XXIX, fig. 2)
Anomopteris mougeoti BRONGNIART, 1828
Neuropteridium sp.
Pecopteris sulziana BRONGNIART, 1828
```

EMBRANCHEMENT DES PRÉPHANÉROGAMES

Ordre des CYCADALES

Zamites vogesiacus SCHIMPER et MOUGEOT, 1844 Ordre des *GINKGOALES*

Baiera sp.

EMBRANCHEMENT DES PHANÉROGAMES

SOUS-EMBRANCHEMENT DES GYMNOSPERMES

CLASSE DES CONIFÈRES (Pl. XXIX, fig. 1)

Albertia sp. Voltzia heterophylla BRONGNIART, 1828 Voltzia sp.

GYMNOSPERMES INCERTAE SEDIS

Aethophyllum sp. Yuccites vogesiacus SCHIMPER et MOUGEOT, 1844 Systèmes radiculaires de Phanérogames indéterminées (GALL et GRAUVOGEL, 1967 c) (Pl. XXVIII, fig. 3)

III. LES ORGANES REPRODUCTEURS

CÔNES FEMELLES DE GYMNOSPERMES

Voltzia sp.

CÔNES MÂLES DE GYMNOSPERMES (GRAUVOGEL-STAMM, 1969)

Masculostrobus rhomboidalis GRAUVOGEL-STAMM, 1969 Masculostrobus ligulatus GRAUVOGEL-STAMM, 1969 Masculostrobus cordiformis GRAUVOGEL-STAMM, 1969 Masculostrobus denticulatus GRAUVOGEL-STAMM, 1969 Voltziostrobus schimperi GRAUVOGEL-STAMM, 1969 Voltziostrobus mougeoti GRAUVOGEL-STAMM, 1969 Sertostrobus laxus GRAUVOGEL-STAMM, 1969

Graines de Préphanérogames et de Gymnospermes

CONCLUSION À L'ÉTUDE PALÉONTOLOGIQUE DU GRÈS À VOLTZIA

1. LA DIVERSITÉ DES ORGANISMES

Le Grès à Voltzia des Vosges mérite d'être mieux connu tant par la diversité des organismes que par leur état de conservation exceptionnel. En effet, la plupart des grands groupes du règne animal y sont représentés : les Rhizoflagellés, les Coelentérés, les Brachiopodes, les Annélides, les Mollusques, les Arthropodes, les Echinodermes et les Vertébrés. Mais chacun de ces groupes ne comporte qu'un nombre réduit de genres. Au total, parmi la faune aquatique, une cinquantaine de genres a été recensée. La majorité d'entre eux ne comprend qu'une seule espèce. Cette pauvreté en espèces contraste avec la richesse en individus. Par exemple plusieurs centaines d'exemplaires de Palaega pumila ont été récoltés dans le seul gisement de Bust (17). Pauvreté en espèces et richesse en individus font pressentir que le milieu a exercé une sélection rigoureuse sur les populations aquatiques. Des conditions de vie difficiles ne permirent qu'à un nombre restreint de formes de s'adapter, mais celles-ci proliférèrent alors abondamment.

Les listes faunistiques et floristiques du Grès à Voltzia sont loin d'être closes et l'exploitation de certains gisements nous réservera encore d'heureuses surprises. Certes, la faune du Grès à Voltzia est moins spectaculaire que celle des Stégocéphales du Trias marocain (DUTUIT, 1966, 1967) ou des grands Sauriens du Monte San Giorgio (KUHN-SCHNYDER, 1963). Les dimensions des organismes demeurent généralement faibles et il faut un oeil exercé pour les reconnaître. Mais l'émerveillement du chercheur n'en est que plus grand lorsqu'il découvre, à l'aide d'un grossissement optique, une anatomie conservée jusque dans ses moindres détails.

2. COMPARAISON AVEC LES FAUNES D'AUTRES ÉPOQUES GÉOLOGIQUES

Les organismes du Grès à Voltzia figurent parmi les plus anciens vestiges paléontologiques de l'ère secondaire. Ils offrent cependant bien des traits délibérément "modernes" qui annoncent les faunes plus récentes. Ceci est particulièrement net chez les Arthropodes. En effet, les limules les scorpions, les araignées et, parmi les Crustacés, les Branchiopodes, les Mysidacés, les Isopodes et les Décapodes ne diffèrent que par des caractères secondaires de leurs représentants du Jurassique ou des époques plus récentes.

Certains éléments de la faune du Grès à Voltzia étaient déjà différenciés vers la fin de l'ère primaire. C'est le cas des foraminifères, des scorpions, des Branchiopodes, des Penaeidés, des Erymidés, des Halicynés, des Sémionotidés et des Coelacanthidés qui sont représentés par les mêmes genres ou des genres voisins au Carbonifère et au Permien.

D'autres formes constituent les premiers représentants de groupes qui s'épanouiront durant l'ère secondaire. Il en est ainsi de nombreux lamellibranches, des limules, des araignées, des Mysidacés, des Isopodes Flabellifères et, parmi les Vertébrés, des Saurichthyiformes et des Capitosauridés.

Le tableau paléobiologique du Grès à Voltzia correspond ainsi à un mélange de formes, les unes héritées des temps paléozoïques, les autres d'origine plus récente. Le renouvellement des faunes qui s'opère à la limite entre les ères primaire et secondaire n'apparaît donc pas comme un remplacement brutal d'organismes anciens par des organismes nouveaux. Il s'agit en réalité d'un relais de formes échelonné sur une longue période. Le phénomène est annoncé dès le Permien et se poursuit durant le Trias. Il permet de comprendre la difficulté que rencontre le stratigraphe lorsqu'il tente d'établir la limite entre le Permien et le Trias (SHERLOCK, 1947)

3. FAUNE NAINE OU POPULATION JUVÉNILE ?

Comparées aux faunes d'autres niveaux géologiques, les organismes du Grès à Voltzia surprennent par leur petite taille. S'agit-il de populations naines ou de populations juvéniles ?

La réponse à cette question paraît plus simple lorsqu'on s'adresse à des espèces qui se retrouvent dans des formations d'âge voisin. C'est le cas des Mollusques du Grès à Voltzia qui se rencontrent dans le Muschelkalk avec des dimensions bien supérieures. Ainsi Myophoria vulgaris n'atteint jamais la grande taille des exemplaires du Trias moyen, bien que le nombre de stries d'accroissement des valves demeure élevé. Dans ce cas, il est possible que des conditions de vie moins favorables que dans le Muschelkalk, par exemple une salinité anormale, soient responsables d'un certain nanisme de la faune malacologique (HALLAM, 1965). Cette interprétation peut également s'appliquer à d'autres formes aquatiques. GUNTER (1947) signale, en effet, que la taille des Penaeus qui peuplent actuellement les eaux saumâtres, augmente lorsque la salinité se rapproche de la normale. Le nanisme semble également de règle chez les organismes terrestres et plus précisément parmi les Arthropodes (LAURENTIAUX-VIEIRA et LAURENTIAUX, 1963).

La discussion est plus délicate face à des espèces uniquement connues par le Grès à Voltzia. Cependant l'inventaire paléontologique détaillé fait souvent apparaître, à côté d'une majorité d'individus de taille moyenne, quelques rares exemplaires de dimensions notablement supérieures provenant de gisements différents. Ainsi Antrimpos atavus a une longueur moyenne de 50 mm, mais quelques échantillons atteignent près de 80 mm. Beaucoup de poissons ont un corps incomplètement recouvert d'écailles et correspondent donc à des individus jeunes. Des êtres à développement plus rapide, comme les esthéries, ne donnent pas lieu à de semblables observations. Tout porte à croire que de nombreux organismes aquatiques du Grès à Voltzia correspondent en réalité à des stades juvéniles. Il semble qu'on se trouve en présence de populations brutalement figées par la mort, avant que la plupart des animaux aient atteint une taille adulte. Le mécanisme de ces mortalités subites sera étudié en liaison avec les données sédimentologiques des gisements. Les dimensions modestes de la faune du Grès à Voltzia laisse pressentir une action frénatrice des facteurs physico-chimiques du milieu. Celle-ci se manifeste de deux manières, soit en provoquant un nanisme de certaines formes, soit en empêchant les individus de parvenir au stade adulte.

4. LES INDICATIONS PALÉOÉCOLOGIQUES

La plupart des organismes du Grès à Voltzia sont aquatiques. Leur distribution stratigraphique et géographique, lorsqu'elle est connue, indique qu'ils sont normalement associés à des milieux marins ou d'eaux saumâtres. Les Echinodermes et bon nombre de Mollusques sont des organismes sténohalins et exigent des eaux marines à salinité constante. Les lingules et vraisemblablement la majorité des autres formes sont, par contre, euryhalines. Elles supportent aisément les variations physico-chimiques de leur milieu de vie. D'autres organismes sont terrestres : les végétaux, les araignées, les scorpions, les myriapodes, les insectes et les Vertébrés Tétrapodes. La réunion d'êtres aux conditions d'existence aussi diverses pose un intéressant problème de paléogéographie qui sera discuté dans les prochains chapitres.

5. LA RÉPARTITION STRATIGRAPHIQUE DES ESPÈCES

L'essentiel de notre documentation paléontologique sur le Grès à Voltzia provient du Grès à meules (Tableau I). C'est dans ce niveau en particulier que sont localisés presque tous les Arthropodes du Buntsandstein supérieur. Par contre, dans le Grès argileux, les organismes à tests et à squelettes calcaires ou phosphatés sont plus fréquents : Foraminifères, Brachiopodes, Mollusques, Echinodermes et Vertébrés. Cette distribution de la faune traduit des milieux de dépôt différents.

Faune et flore n'acquièrent leur pleine signification que replacées dans leur contexte sédimentaire. C'est par l'étude des gisements fossilifères qu'on peut espérer reconstituer les paysages du Grès à Voltzia. Elle fait l'objet de la deuxième partie de ce mémoire.
TABLEAU I

Liste et répartition des organismes et des témoins de l'activité biologique identifiés dans le Grès à Voltzia du Nord des Vosges

FAUNE	Grès à meules	Grès argileux
FORAMINIFÈRES		
Glomospirella oscillens KOEHN-Z., BRÖNN. et GALL Glomospirella aff. spirillinoides (GROZ. et GLEBOV.) Glomospira sp. Agathammina aff. austroalpina KRTOLLMANN et TOL. Lagénidés	+ + + +	+++++
COELENTÉRÉS		
Progonionemus vogesiacus GRAUV. et GALL	+	
BRACHIOPODES		
Lingula tenuissima BRONN	+	+
ANNÉLIDES		
Eunicites triasicus GALL et GRAUV. Homaphrodite speciosa GALL et GRAUV. Spirorbis cf. pusillus (MARTIN) Triadonereis sp.	+ + + +	
MOLLUSQUES		
Lamellibranches		
Modiolus sp. Hoernesia sp. Entolium discites (SCHLOT.) Eopecten cf. albertii (GOLDF.) Pectinacea indét. Enantiostreon cf. difforme (SCHLOT.) Myophoria vulgaris (SCHLOT.) Myophoria sp. Homomya impressa (ALB.) Homomya albertii (VOLTZ) Homomya sp. Pleuromya elongata (SCHLOT.) Pleuromya sp. Gastéropodes Naticopsis gaillardoti LEFR. Loxonema obsoletum (ZIETEN)	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +	+ + + + + + + + + + + + + + + + + + + +
Loxonema obsoletum (ZIETEN) Undularia scalata (SCHLOT). Gastéropodes indét.	+	+++++++
ARTHROPODES		
Mérostomes		
Limulitella bronni (SCHIMPER)	+	
Arachnides		
Araignées	+	

	Grès à meules	Grès
Crustacés	u meares	urgiteus
Crustaces Triops cancriformis minor TRUSHEIM Isaura minuta minuta (ZIETEN)	+	
Isaura sp. A Isaura sp. B Palaeolimnadia alsatica REIBLE Palaeolimnadiopsis dictyonata REIBLE	+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++	
Praeleaia sp. Cytheracea indét. Triassinella aff. tsorfatia (SOHN) Ostvacedes indét	+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++	
Euthycarcinus kessleri HANDL. Triasocaris peachi BILL Schimperella beneckei BILL Schimperella kessleri BILL Palaega pumila GALL et GRAUV. Diaphanosoma rare BILL	+ ? + ? + ? + ?	+
Antrimpos atavus (BLL) Clytiopsis argentoratensis BLL Halicyne ornata TRÜMPY	+ + +	+
Myriapodes		
Diplopodes	+	
Hexapodes		
Insectes	+	
ÉCHINODERMES		
Echinodermes indét. Cidaris cf. grandaeva GOLDF. Ophiures		+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
VERTÉBRÉS		
Poissons		
Chondrostéens indét. Saurichthys daubreei FIRTION Pericentrophorus aff. minimus JÖRG Coelacanthidé Dents	+ ? + +	+
Tétrapodes		
Stégocéphales indét. Odontosaurus voltzii MEYER Capitosauridés indét. Reptiles	+ + + +	?
DINS DE L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE		
PONTES ET OEUFS		
Monilipartus tenuis GALL et GRAUV. Clavapartus latus GALL et GRAUV. Furcapartus exilis GALL et GRAUV. Oeufs d'esthéries Palaeoxyris regularis BRONGN.	+ + + +	
Oeufs auréolés de Poissons	+	

	Grès à meules	Grès argileux
COPROLITHES		
COF ROLLINGS	+	
TRACES D'ACTIVITÉ ANIMALE		
Rhizocorallium var. Glossifungites	+	+
Isopodichnus	+	+
Kouphichnium	+	+
Empreintes pectinées	+	.
Empreintes "chirothérioïdes"	+	+
Planolites	+	+
Taenidium Traces de fouissement	+	
Traces de Touissement	+	+
FLORE (à l'exclusion des spores et des pollens)		
ACRITARCHES		
Leiosphaeridia sp.	+	
Micrhystridium sp.	+	
CRYPTOGAMES VASCULAIRES		
Pleuromeia sp.	+	
Schizoneura paradoxa SCHIMP, et MOUG. Equisetites mougeoti (BRONGN.)	+	
Equisetites sp.	+	
Rhizomes d'Equisétales	+	
Anomopteris mougeoti BRONGN. Neuropteridium sp	+	
Pecopteris sulziana BRONGN.	+	
PRÉPHANÉROGAMES		
Zamites vogesiacus SCHIMP, et MOUG.	+	
Baiera sp.	+	
PHANÉROGAMES		
Albertia sp.	+	
Voltzia heterophylla BRONGN. Voltzia sp	+	+
Aethophyllum sp.	+	+
Yuccites vogesiacus SCHIMP. et MOUG.	+	
Systèmes radiculaires de Phanérogames Mascaulostrobus, rhomboidalis, CRAUV, STAMM	+	
Masculostrobus lingulatus GRAUV STAMM	+	
Masculostrobus cordiformis GRAUV STAMM	+	
Masculostrobus denticulatus GRAUV STAMM	+	
Voltziostrobus mougeoti GRAUV STAMM	+	
Sertostrobus laxus GRAUV STAMM	+	
Graines	+	

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE SÉDIMENTOLOGIQUE ET PALÉOÉCOLOGIQUE DU GRÈS À VOLTZIA

Le Grès à Voltzia n'affleure pratiquement jamais en dehors des exploitations. Celles-ci s'implantent sur les flancs des nombreuses vallées qui entaillent la couverture triasique des Vosges ou se développent à la faveur d'un compartiment faillé d'un champ de fracture (Fig. 1).

Par son grain fin et sa taille aisée, le Grès à Voltzia est un matériau de choix pour la construction. Sa coloration, qui varie du gris beige au rouge foncé, lui confère un effet décoratif certain (étymologiquement, "Buntsandstein" signifie grès multicolore). Maints édifices et monuments de l'Est de la France en témoignent : ainsi les admirables dentelles de pierre de la cathédrale de Strasbourg.

L'exploitation du Grès à Voltzia se poursuivit activement jusqu'à la fin de la dernière guerre mondiale. La concurrence du béton provoqua alors une récession de la production et de nombreuses carrières furent abandonnées. Mais depuis quelques années, les exploitations de grès connaissent un nouvel essor. Il est dû à un goût croissant pour la pierre naturelle et, surtout, à l'usage de scies à disques diamantés qui permettent un découpage des blocs bien plus rapide que par les procédés anciens.

L'étude des carrières de grès est d'un grand intérêt. En effet, l'orientation des différents fronts de taille permet des observations sédimentologiques dans les trois dimensions de l'espace. Dans les exploitations encore en activité, l'avancement des travaux facilite la cartographie précise de la géométrie des corps sédimentaires et fait apparaître sans cesse de nouveaux gisements fossilifères. Grâce à l'obligeante amitié que Mr. L. GRAUVOGEL m'a témoignée depuis dix ans, j'ai pu profiter, pour certaines carrières, d'observations poursuivies durant près de trente années.

I – LIMITES ET SUBDIVISIONS STRATIGRAPHIQUES DU GRÈS À VOLTZIA

I. HISTORIQUE

Pour les auteurs anciens (ÉLIE DE BEAUMONT, 1828 ; HOGARD, 1837 ; DAUBRÉE, 1852), le Grès bigarré comprend l'ensemble des formations gréseuses qui surmontent le Grès vosgien. Il englobait ainsi les Couches intermédiaires, le Grès à Voltzia et même la base du Muschelkalk inférieur. Dès cette époque, le Grès bigarré est divisé en deux termes dont la limite passe en plein milieu du Grès à Voltzia (Tableau II). Des caractères sédimentologiques et paléontologiques justifient cette subdivision. Au contraire, VOLTZ (1836) fait du Grès vosgien le Grès bigarré inférieur. Il distingue ensuite un Grès bigarré moyen formé de bancs massifs avec des végétaux et des crustacés, et un Grès bigarré supérieur où les grès alternent avec des bancs argileux et des dolomies et renferment une faune de Mollusques, de Brachiopodes et de Vertébrés. HOGARD (1837) désigne ces mêmes niveaux sous le nom de haute masse ou ler étage pour la partie inférieure et de grès argileux ou 2ème étage pour la partie supérieure. C'est à WEISS (1864) que revient le mérite d'avoir caractérisé la partie supérieure du Buntsandstein par son fossile guide, la Gymnosperme Voltzia heterophylla. Quelques années plus tard (1869 a), il en détachera les formations gréso-dolomitiques à faune marine de la base du Muschelkalk pour en faire le Muschelsandstein (Grès coquillier ; A. de LAPPARENT, 1883). En 1877, BENECKE définit les Zwischenschichten (Couches intermédiaires ; A. de LAPPARENT, 1900) qui séparent le Grès vosgien et le Conglomérat principal du Grès à Voltzia. Dès lors, la formation du Grès à Voltzia était bien individualisée.

Dans son travail sur le Buntsandstein de la Sarre, STAESCHE (1927), reprenant l'ancienne limite entre les deux étages du Grès bigarré définie par VOLTZ et HOGARD, distingue un Grès à Voltzia inférieur ou Hauptwerkstein et un Grès à Voltzia supérieur ou Lettenregion. PERRIAUX (1961) traduisit ces deux termes par Grès à meules et Grès argileux. Cette terminologie est désormais classique.

II. LES LIMITES DU GRÈS À VOLTZIA

Si la notion de Grès à Voltzia comme terme supérieur du Buntsandstein fut acquise progressivement au cours du siècle dernier, des imprécisions persistèrent longtemps encore sur la définition exacte de ses limites. Elles sont dues d'une part à la rareté des affleurements qui offrent une coupe complète de la formation et d'autre part à la grande variabilité des profils au niveau d'un même affleurement.

1. LA BASE DU GRÈS À VOLTZIA

Le passage des grès des Couches intermédiaires aux bancs du Grès à Voltzia inférieur est graduel. SCHUMACHER (1891) affirme que la limite entre les deux formations est purement subjective et qu'il existe, en particulier dans la région de Volmunster (Moselle), une zone de transition d'environ 7,50 m qu'il appelle le "Zwischenschichtenähnlicher Voltziensandstein", c'est-àdire le Grès à Voltzia ressemblant aux Couches intermédiaires. SCHAD (1934) et FORCHE (1935) abondent dans le même sens. En 1927, STAESCHE signale l'existence d'un banc argileux repère, épais de 1,75 m, à la base du Grès à Voltzia ; mais il reconnaît que cet horizon manque fréquemment.

TABLEAU II

Subdivisions stratigraphiques du Buntsandstein des Vosges et leur articulation avec le Muschelkalk

N (Nomenclature française (d'après Perriaux, 1961)			Nomenclature française Nomenclature allemande (d'après Perriaux, 1961) (complétée d'après Müller et Schröder, 1960)		Ancienne nomenclature française		Notations des cari 25.0 géologiques au: 50.0 80.0	tes
INFÉR.	α u L L Supérieurs		Niveaux dolomitiques H Mi supérieurs H Ab			Musshalkalk	mu2 †3с †11 b		
ELKALK	c	ouches à Myacites	ER MUSCI	Myacitenbänke		Muscheikaik	m u 1 † 3 b † Ⅲ с		
MUSCH	0	Grès coquillier	UNTER	Muschelsandstein	Grès bigarré w supérieur (Voltz,1836)		mu1 f3a fⅢc		
IEUR	VOLTZIA	Grès argileux	N	Lettenregion	GRÈS BIGAI	ou 2® étage du Grès bigarré (Hogard,1837)	s o 2 † 2 b		
supér	GRÈS À	Grès à meules	ANDSTE	Werkstein	a D B B Grès biggrré		+ III		
SANDSTEIN	(Couches intermédiaires supérieures		Obere Zwischenschichten		moyen (Voltz,1836) ou 1 ^{er} étage du Grès bigarré (Hogard,1837)	so 1 t2 a		
BUNTS	(Couches intermédiaires inférieures	OBEF	Untere Zwischenschichten			fШ		
MOYEN	Conglomérat principal		nglomérat principal			h t1d ou t2 P t1⊠ a			
NDSTEIN		Grès vosgien supérieur	R BUNTSA	Oberer Vogesensandstein	erer Vogesensandstein Sig inférieur (V		sm 2 †1c †17∑ b		
BUNTSAN		Grès vosgien inférieur	MITTLERE	Unterer Vogesensandstein	ES DES	Grès vosgien	sm.1 f1b f1⊠b		
BUNTSANDSTEIN		Grès d'Annweiler	BUNTSANDSTEIN	Annweiler Sandstein	GRE		su t1 a t127 c		

Déjà WEISS (1875 a), MEYER et van WERVEKE (in GREBE, WEISS et van WERVEKE, 1892) et SCHUMACHER (1902) avaient attiré l'attention sur un niveau bréchique et dolomitique situé près de la base du Grès à Voltzia. Mais ce seront MÜLLER et SCHRÖDER (1960) qui reconnaîtront la grande extension horizontale de ce niveau dans le Buntsandstein de la rive gauche du Rhin et en feront la limite inférieure du Grès à meules : c'est la "basale Dolomitbrekzie". PERRIAUX (1961) le désignera sous le nom de "banc de brèche dolomitique supérieur" pour le distinguer d'un horizon semblable de la base des Couches intermédiaires. Dans la région étudiée, ce niveau se retrouve dans plusieurs carrières où il constitue souvent le point de départ de l'exploitation. Les carriers hésitent en effet à descendre leur front de taille sous cet horizon de grande dureté. En Sarre, celui-ci est qualifié de "Gaustein" (WEISS, 1876), en Alsace et en Lorraine septentrionale de "Eisen" (en allemand, fer).

Pour PERRIAUX (1961), le banc de brèche dolomitique supérieur provient du remaniement de la croûte calcaire d'un ancien sol. Il en fait le sommet des Couches intermédiaires. Cet auteur fait débuter le Grès à Voltzia par l'"horizon à plantes de base", grès jaunâtre à nombreux restes végétaux ("pflanzenführende Lage" de MÜLLER et SCHRÖDER, 1960). Dans une telle interprétation ni le banc de brèche dolomitique supérieur, ni l'horizon à plantes de base ne peuvent avoir une réelle signification chronostratigraphique. Ils dépendent tous deux du caprice d'un apport détritique. Des grès riches en restes végétaux se rencontrent en effet à différents niveaux du Grès à Voltzia. C'est le faciès des grès à plantes (p. 111). Par ailleurs, tant dans les Couches intermédiaires (PERRIAUX, 1961 ; p. 82) que dans le Grès à meules (GALL et GRAUVOGEL, 1968 a) apparaissent des niveaux bréchiques dolomitiques. Il est vrai qu'ils n'ont jamais ni la constance, ni l'extension du banc de brèche dolomitique supérieur.

Du point de vue stratigraphique, la limite inférieure du Grès à Voltzia reste donc arbitraire. En fait, elle semble coïncider avec une limite paléontologique. Dans les couches intermédiaires, les fossiles sont exceptionnels : quelques végétaux et de rares vestiges de Vertébrés. Par contre, le Grès à Voltzia renferme la riche faune et flore étudiées précédemment. Dans le cadre d'une étude paléogéographique régionale, on peut alors attribuer une certaine valeur chronostratigraphique au banc de brèche dolomitique supérieur et le maintenir comme limite inférieure du Grès à Voltzia (Fig. 19).

2. LA LIMITE ENTRE LE GRÈS À MEULES ET LE GRÈS ARGILEUX

La limite entre les deux horizons du Grès à Voltzia, Grès à meules et Grès argileux, a déjà été reconnue par les auteurs du 19ème siècle. C'est celle qui sépare les Grès bigarrés moyen et supérieur de VOLTZ (1836) et les deux étages de HOGARD (1837). Sur le terrain, elle s'impose à l'observateur tant les caractères sédimentologiques des deux niveaux sont opposés. Aux grès massifs et lenticulaires, entrecoupés de passées argileuses, du Grès à meules, succède une alternance de grès d'épaisseur faible, de bancs argileux et de grès dolomitiques. Le contact entre les deux horizons a parfois la netteté d'un coup de couteau (Pl. XXX). Dans la carrière de Soultz-les-Bains, VOLTZ (1836) a montré que la limite entre les deux formations était également une limite paléontologique. Par la suite, cette observation tomba quelque peu dans l'oubli.

Récemment, dans le domaine des Vosges du Nord, une végétation in situ fut mise en évidence au sommet du Grès à meules (GALL et GRAUVOGEL, 1967 c). De plus, le Grès argileux débute, dans la même région, par un banc carbonaté à faune marine, identique à celle du Muschelsandstein. La signification paléogéographique de cette succession de faciès est importante. Elle permet de toucher du doigt le début de la transgression du Muschelkalk et confirme ainsi le bien-fondé de la distinction entre Grès à meules et Grès argileux.

3. LA LIMITE SUPÉRIEURE DU GRÈS À VOLTZIA

Rarement limite stratigraphique ne fut autant controversée que celle qui sépare le Buntsandstein du Muschelkalk. Pour s'en convaincre, il suffit de consulter les descriptions données par différents auteurs de la carrière royale de Soultz-les-Bains (carrière n° 32 de l'Annexe I). Cet affleurement, encore accessible aujourd'hui, montre vers le sommet du front de taille, un banc repère constitué par un grès à grands ellipsoïdes (structures de surcharge).

Pour von ALBERTI (1834, p. 181), VOLTZ (1836, p. 2) et DAUBRÉE (1852, p. 12) la limite supérieure du Buntsandstein se situe respectivement à 13,50 m, 15 m et 16 m au-dessus du sommet du Grès à meules. Ces auteurs incluaient dans leur Grès bigarré une partie du Muschelsandstein. BENECKE (1877, p. 562) et les auteurs du guide géologique de l'Alsace (BENECKE et al., 1900; p. 189) placent cette limite nettement plus bas, car ils rapportent au Muschelkalk le niveau à ellipsofides. PERRIAUX (1961, p. 108) indique une épaisseur de 13,20 m pour le Grès argileux et situe le sommet du Grès à Voltzia à 1,70 m au-dessus du grès à ellipsofides.

La difficulté pour établir avec précision la limite supérieure du Buntsandstein est due à l'imbrication des faciès et à l'absence d'une limite paléontologique nette.

a - La distinction des faciès du Buntsandstein et du Muschelkalk

Après avoir extrait le Grès coquillier du Grès à Voltzia, WEISS (1869 b) définit les "Grenzletten" (Argile limite ; THÉOBALD, 1951). Il s'agit de bancs argileux couronnant le Buntsandstein, au-dessus desquels se succèdent uniquement des grès dolomitiques jaunâtres et, accessoirement, des niveaux argileux ou gréseux de couleur grise, plus rarement rouge.

Cette définition est ambigué, car déjà dans le Grès argileux apparaissent des ensembles dolomitiques d'épaisseur non négligeable. Sur le terrain l'Argile limite manque d'ailleurs fréquemment. PERRIAUX (1961, p. 93), discutant la limite supérieure du Grès à Voltzia, la situe "à la base du complexe constitué uniquement par des bancs de Grès coquillier typique", c'est-à-dire lorsque disparaissent les grès à "coloration lie-de-vie ou grise classique" (ibidem). Il s'agit donc d'une limite de faciès, sans valeur chronostratigraphique. Elle permettra à cet auteur de dresser une carte des isopaques du Grès argileux et de mettre en évidence un seuil vosgien sur lequel le Grès à Voltzia supérieur ne s'est jamais déposé.

b - La limite paléontologique

Par définition, le Grès coquillier est caractérisé par une riche faune marine. Dans le Sud des Vosges, il est représenté par les grès de Ruaux (LÉTARD, 1888). BENECKE (1877) signale près de la base du Grès coquillier un banc à entroques de 10 cm d'épaisseur, de grande extension horizontale. Ce niveau sera souvent utilisé par les géologues cartographes pour repérer la base du Muschelkalk (SCHUMACHER, 1890).

Mais à maintes reprises des associations faunistiques identiques furent signalées dans le Grès à Voltzia. Les mémoires de MAUBEUGE (1959) et de PERRIAUX (1961) donnent une liste détaillée de ces découvertes. Depuis, elles ont été complétées par de nombreuses observations personnelles (Tableau XV).

Pour PERRIAUX (1961, p. 93), les niveaux à faune marine du Grès argileux correspondent à des incursions marines fugaces. L'auteur affirme que la limite Buntsandstein-Muschelkak est à la fois une limite paléontologique et une limite de faciès : la faune du Grès à Voltzia serait continentale ou exceptionnellement laguno-marine, celle du Grès coquillier serait typiquement marine. Cette distinction tranchée a été récemment remise en cause (MAUBEUGE, 1959 ; DURAND et JURAIN, 1968, 1969 ; GALL et GRAUVOGEL, 1968 a). Par une étude détaillée et une prospection systématique des gisements fossilifères du Grès à Voltzia on pouvait espérer apporter une solution à ce problème. C'est l'un des objectifs de ce travail.

La confrontation des données de la paléontologie avec celles de la pétrographie, de la stratonomie et de la géochimie a mis en évidence sept faciès dans le Grès à Voltzia :

les grès sains, les grès à plantes, les niveaux argileux et les niveaux carbonatés au sein du Grès à meules ;

les grès à dalles, les bancs argileux et les bancs carbonatés au sein du Grès argileux.



Figure 19 - Coupe schématique et subdivisions du Grès à Voltzia dans le Nord des Vosges.

II – ÉTUDE SÉDIMENTOLOGIQUE ET PALÉOÉCOLOGIQUE

A – LE GRÈS À MEULES

Le Grès à meules est épais, en moyenne, d'une douzaine de mètres. Il forme le front de taille des exploitations. Au premier abord, il déconcerte par la grande variabilité de ses profils. Même au niveau d'un affleurement, l'ordonnance et les caractères des couches changent considérablement. Les ravinements et les passages latéraux de faciès sont la règle, ce qui rend le relevé détaillé des coupes particulièrement malaisé.

CHAPITRE 1

LES GRÈS SAINS

La partie exploitée du Grès à Voltzia inférieur est formée de bancs massifs de plusieurs mètres d'épaisseur. Ce sont les grès "sains" des carriers. Ils sont séparés par des interstrates ou des joints de stratification argileux qui facilitent le décollement des blocs.

La couleur dominante est, suivant les localités, le rose (HUE 10 R 4/2)^{*} ou le gris beige (HUE 5 Y 6/2). Parfois la roche présente des reflets verdâtres. En moyenne, les grès sains constituent 70 % de l'épaisseur totale du Grès à meules.

I – DESCRIPTION PÉTROGRAPHIQUE

1. GRANULOMÉTRIE

A cause de la dureté des grès, les dimensions et les pourcentages des éléments des roches ont été uniquement déterminés sur plaques minces. Les mesures, faites à l'aide d'un micromètre, sont donc légèrement inférieures aux tailles réelles et leur dispersion est exagérée. Le but essentiel de l'étude granulométrique étant de permettre la comparaison entre différents faciès gréseux, il n'a pas été jugé nécessaire de corriger les résultats obtenus. Quatre paramètres ont paru suffisants pour caractériser les échantillons étudiés : le grain moyen, le grain maximum, le classement et l'asymétrie (VATAN, 1967).

TABLEAU III

Principaux paramètres granulométriques des faciès gréseux du Grès à Voltzia et du Muschelsandstein. Les tailles des grains détritiques ont été mesurées sur plaques minces

Niveau stratigraphique	Faciès	Localité	Référence des lames minces	Référence des courbes granulomé- triques	Grain moyen Q_2	Grain maximum	$\frac{Classement}{\sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}}}$	$\begin{array}{c} \operatorname{Asymétrie} \\ \underline{Q_1 \times Q_2} \\ \underline{(Q_2)^2} \end{array}$
Muschelsandstein	Grès dolomi- tiques	Vilsberg	105	4	0,10 mm	0,36 mm	1,36	0,99
Grès argileux	Grès à dalles	Adamswiller Hangviller Niderviller	80,81 73,74 125	3a 3b	0,10 0,10 0,11	0,39 0,30 0,36	1,57 1,54 1,86	0,76 0,83 0,78
Grès à	Grès sains	Adamswiller Hangviller Hangviller Schoenbourg	A3 LAM T1 117	1b 1a	0,10 0,07 0,10 0,09	0,36 0,45 0,36 0,30	1,58 1,48 1,53 1,50	0,88 0,92 0,78 0,85
meules	Grès à plantes	Adamswiller Adamswiller Lohr	115 119 L2	2b 2a	0,20 0,16 0,16	0,60 0,48 0,81	1,50 1,93 1,92	0,85 0,60 0,71

(*) Couleurs de la Charte internationale des couleurs des roches, publiée par The Geological Survey of America (New York, 1963). Les couleurs sont celles de la roche préalablement mouillée.



Fociès des grès sains du Grès à meules

a. Hangviller b. Adamswiller





Faciés des grès à plantes du Grès à meules
 a. Lohr
 b. Adomeviller



Figure 20 - Courbes granulométriques cumulatives et courbes de fréquence des faciès gréseux du Grès à Voltzia et du Muschelsandstein.

L'aspect des grès sains est remarquablement uniforme. Le grain moyen oscille autour de 0,10 mm (Fig. 20 ; tableau III). Dans la nomenclature de WENTWORTH (1922), il s'agit d'un grès fin. Son classement est toujours excellent (coefficient de classement voisin de 1,50). Ces résultats sont conformes à ceux cités par PERRIAUX (1961, p. 117-128) dans son travail sur les Vosges gréseuses.

Un granoclassement vertical n'est guère sensible à l'échelle du banc. Cependant la base des bancs de grès sains renferme, sur une épaisseur de quelques centimètres, des galets pélitiques plats de couleur verte ou rouge, souvent mêlés à des galets de grès dolomitique, et des restes végétaux. Il s'agit du remaniement du faciès des grès à plantes qui sera décrit plus loin.

2. COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

Le tableau IV donne les pourcentages relatifs des principaux constituants des grès sains. Ils ont été établis en lame mince par le procédé du comptage par points (JUNG et BROUSSE, 1959). Le dosage par diffraction des rayons X avec étalon interne des poudres des mêmes échantillons, par une méthode mise au point à l'Institut de Géologie de Strasbourg par WEBER et LARQUÉ (1969), a permis d'améliorer ces résultats.

TABLEAU IV Composition minéralogique (en %) de quelques échantillons de grès sains. La fraction indosée concerne les grains lithiques, les amas phylliteux et divers minéraux accessoires

Référence de l'échantillon	Localité	Quartz	Microcline	Muscovite	Biotite	Ciment pélitique	F raction indosée
109	Mackviller	55	28	1	0,50	4	11,50
117	Schoenbourg	53	28	3	1	3,50	12
LAM	Hangviller	54	30	1,50	0,50	3,50	10,50
118	Niderviller	57	25	1,50	0,50	3,50	12,50
124	Soultz-1B.	64	20	2	0,50	3,50	10

Le quartz

Le quartz représnete 55 à 65 % de la roche. Les grains sont limpides et moyennement arrondis. Ils deviennent subanguleux dans le domaine des petites tailles. Fréquemment la surface des quartz montre des excroissances irrégulières qui sont l'indice d'un nourrissage en silice. Celui-ci est plus ou moins prononcé suivant les localités. Ailleurs, les grains se moulent étroitement les uns les autres suivant un contact stylolithique.

Les feldspaths

La teneur des grès en feldspaths est élevée : 25 % en moyenne. La roche est un grès arkosique. Les feldspaths alcalins sont uniquement représentés par le microcline. Si les plagioclases intacts sont exceptionnels, il n'est pas rare, cependant, d'observer des amas phylliteux provenant de leur altération. Les feldspaths présentent souvent des auréoles de nourrissage importantes qui rétablissent des contours idiomorphes. En lame mince, leur "coeur", plus ou moins altéré, reste bien visible. La coloration sélective des feldspaths (LADURON, 1966) a révélé que ce nourrissage est potassique.

Pour LILLE et SCOLARI (1968), les accroissements de quartz ou de feldspath constituent un phénomène diagénétique précoce qui serait antérieur à la compaction du sédiment. Ils se produisent lorsque des apports continentaux riches en silice et en alumine dissoutes aboutissent dans un milieu de sédimentation faiblement confiné. Dans le Buntsandstein moyen du Sud de l'Allemagne, FÜCHTBAUER (1967) a montré que la croissance diagénétique des feldspaths potassiques était la règle. Pour cet auteur, les percolations de solutions potassiques seraient caractéristiques d'un régime fluviatile. Par contre, le milieu saumâtre du Buntsandstein de l'Allemagne du Nord a provoqué un nourrissage albitique des feldspaths.

7

Les micas

La muscovite est toujours présente dans les grès sains. Elle forme des paillettes visibles à l'oeil nu (jusqu'à 1 mm de diamètre), couchées parallèlement au litage de la roche.

La biotite a été rencontrée dans tous les échantillons de grès sains. Elle n'a pas été notée par PERRIAUX (1961, p. 85), sans doute à cause de son état d'altération qui la rend difficilement identifiable. En effet, elle n'a jamais la fraîcheur de la muscovite. Elle est fréquemment écrasée entre les grains de quartz et de feldspath. Tous les stades se rencontrent entre des biotites peu altérées, à pléochroïsme intense, des biotites décolorées et des agrégats très peu biréfringents provenant de leur décomposition. Les biotites altérées sont fragiles (RIMSAITE, 1957). Il faut donc admettre que cette altération s'est essentiellement produite après le dépôt du sédiment.

La chlorite est moins abondante. Concentrée dans certains joints micacés des grès, elle confère un reflet verdâtre à la roche.

Les éléments accessoires

Le cortège des minéraux lourds des grès sains est banal : tourmaline, zircon, grenat, magnétite ...

Les grains lithiques sont fréquents. Il s'agit de microgalets polycristallins de la taille des grains de quartz : quartzites et, plus rarement, micaschistes.

Les grès renferment parfois une proportion non négligeable de calcite. Elle peut dépasser 1 % du volume de la roche. Cette teneur en carbonates est responsable en grande partie de la maladie des grès de nombreux édifices anciens (MILLOT et al., 1967).

Le ciment

Le ciment des grès sains est du type pélitique (JUNG, 1958). Il consiste en un amalgame de minéraux argileux provenant de l'altération des micas et des feldspaths. Il est le support du pigment rouge (hématite et goethite).

Conclusion

Les grès sains sont des grès fins feldspathiques. Ils représentnet un matériel jeune ayant subi une altération mécanique ménagée. Ils proviennent de l'érosion d'un continent hercynien qui aurait occupé l'emplacement actuel du seuil morvano-vosgien (BRINKMANN, 1926; FORCHE, 1935; PERRIAUX, 1961). Le socle granitique et gneissique de ce "Continent gaulois" serait à l'origine de l'énorme accumulation de matériel gréseux du Buntsandstein.

La fraction détritique du ciment est peu importante (3 à 4 % des éléments figurés de la roche). Il s'agit d'un grès évolué, "submature" dans la terminologie proposée par FOLK (1951). Sa mise en place implique un milieu suffisamment turbulent pour permettre l'élimination de la fraction argileuse et le classement des particules. Après son dépôt, le sédiment a été affecté par des phénomènes de diagenèse : altération des biotites, nourrissage des quartz et nourrissage des feldspaths. Ces deux dernières néoformations s'effectueraient dans un milieu de sédimentation faiblement confiné.

3. COMPOSITION CHIMIQUE

Les analyses chimiques ont porté sur 25 échantillons de grès sains. Les résultats sont très homogènes. Ils figurent dans le tableau XVIII. Ils seront discutés dans le chapitre D consacré à l'étude géochimique du Grès à Voltzia.

II – STRATONOMIE DES GRÈS SAINS

La stratonomie a pour objet la description des caractères de la stratification et du litage, ainsi que des structures et des figures sédimentaires (LOMBARD, 1956, 1963). Elle nous informe sur le mode de dépôt des sédiments et sur le mécanisme de leur mise en place.

A - La stratification

La stratification est la disposition des dépôts sédimentaires en couches distinctes et séparées (LOMBARD, 1965). Ce terme a donc un sens purement descriptif.

Les bancs de grès sains ont une épaisseur variant de quelques décimètres à plusieurs mètres. Ils sont nettement séparés des bancs sous-jacents ou surincombants par des interstrates ou des cicatrices d'érosion. Lorsque l'affleurement est suffisamment vaste ou lorsqu'on suit, au cours des années, les travaux d'exploitation (Pl. XXX, fig. 1), on constate que ces bancs sont en réalité de grandes lentilles de grès. Leur longueur apparente varie de quelques dizaines de mètres à plus de cent mètres. Leur surface inférieure est faiblement convexe. Leurs extrémités se terminent en biseau. Par suite du jeu des ravinements successifs, l'extension originelle de ces corps sédimentaires demeure inconnue.

B – Le litage

Dans la littérature géologique, les termes de stratification et de litage n'ont pas toujours été clairement distingués. Pour BOURCART (1944) et LOMBARD (1963), le litage correspond à des structures secondaires au sein des strates et des interstrates, produites au cours de la phase active du dépôt. Son expression la plus commune est une succession de fins feuillets sédimentaires. C'est cette définition du litage qui sera adoptée ici. On lui réserve parfois l'appellation de stratification mineure, par opposition à la stratification majeure qui concerne l'agencement des bancs entre eux (CHAMBRE SYNDICALE DE LA RECHERCHE ET DE LA PRODUCTION DU PÉTROLE ET DU GAZ NATUREL, 1966).

Dans le Grès à Voltzia, la distinction entre stratification et litage est aisée car l'échelle d'observation des deux phénomènes est différente. Elle a également une signification génétique.

1. LES LAMINES

Les grès sains sont caractérisés par un litage plan-parallèle subhorizontal (Pl. XXXIII, fig. 1). Les feuillets sédimentaires élémentaires qui le constituent ont une épaisseur de 0,5 à quelques millimètres. Elle dépasse rarement le centimètre.

Cette disposition correspond à la texture à laminations ou laminae (singulier : lamina) des auteurs de langue anglaise (Mc KEE et WEIR, 1953 ; CAMPBELL, 1967). Ce sont les laminites de deuxième ordre de LOMBARD (1960) et les séquences-unités de MANGIN (1964). L'usage français tend à lui substituer le terme de lamine (CHAMBRE SYNDICALE DE LA RECHERCHE ET DE LA PRODUCTION DU PÉTROLE ET DU GAZ NATUREL, 1966).

L'examen microscopique des grès sains montre que le litage est dû à un granoclassement vertical des minéraux. La partie basale de la lamine, de teinte plus claire que le sommet, renferme les grains de quartz les plus volumineux. Dans la partie supérieure, plus riche en matériel pélitique, sont rassemblées les lamelles de muscovite disposées horizontalement. L'orientation des micas blancs facilite le délit de la roche.

2. LES MODIFICATIONS DU LITAGE

a) LITAGE OBLIQUE

Le litage plan-parallèle subhorizontal se trouve perturbé à la base des bancs de grès. Il peut s'évanouir entièrement sur une certaine épaisseur. Plus fréquemment un litage oblique apparaît. Il en est de même vers les bords des lentilles de grès.

Au sein même d'un banc, s'observent toujours des groupes de lamines coupées en biseau. Ils peuvent s'ordonner en faisceaux entrecroisés. Cette modification du litage est l'expression d'érosions pénécontemporaines d'importance locale.

b) LITAGE INDUIT PAR DES RIPPLE-MARKS

Le litage ondulé - Parfois, vers le sommet des bancs de grès sains, la section des lamines révèle des ondulations régulières d'ordre décimétrique. Elles correspondent à la succession de rides d'oscillation ou de rides de courant à crêtes continues et rectilignes.

La microstratification entrecroisée (micro-cross-stratification) - Elle résulte de la migration de trains de ripple-marks linguoïdes ou en croissant qui se chevauchent successivement au cours de leur progression (Mc KEE, 1939 ; WURSTER, 1958 ; HAMBLIN, 1961). Suivant des plans perpendiculaires au sens du courant apparaissent les sections lenticulaires des ripple-marks. Dans des directions de coupe qui lui sont parallèles, s'observent les empilements des feuillets obliques des rides (Fig. 21). En surface structurale altérée, ces mêmes feuillets présentent une section arquée ; ils sont groupés en corps allongés correspondant aux rides originelles (P1. XXXIII, fig. 3).



Figure 21 - Bloc - diagramme illustrant l'origine de la microstratification entrecroisée à partir de rides en croissant (d'après WURSTER, 1963)

A. Surface structurale à ripple-marks (la flèche indique le sens du courant)

B. Coupe suivant un plan subhorizontal.

La structure madrée - Un mécanisme analogue donne naissance à la "Flaserschichtung" des auteurs de langue allemande (HÄNTZSCHEL, 1936 ; REINECK, 1960), terme qu'on peut traduire par structure madrée.

Lorsqu'un champ de ripple-marks cesse d'être actif, le matériel fin en suspension dans l'eau est piégé dans les vallées qui séparent les crêtes. Le passage d'un nouveau train de rides érode les crêtes des ripple-marks précédents, mais respecte généralement le fond des vallées. En coupe, le sédiment présente alors un aspect caractéristique : au sein du sable ou du grès sont disposées plus ou moins régulièrement des lentilles concavo-convexes de matériel pélitique évoquant la madrure du bois (Fig. 22 ; pl. XXXIII, fig. 2). L'inclinaison des feuillets élémen-



Figure 22 - Diagramme montrant l'origine de la structure madrée (Flaserschichtung) à partir de trains successifs de ripple-marks (d'après REINECK, 1960).

Les flèches illustrent l'inversion du sens des courants de flot (a, e, i) et de jusant (c, g, l) séparés par les périodes d'étale (b, d, f, h, k, m). en noir : dépôt pélitique

en pointillé : les feuillets élémentaires des rides

taires des ripple-marks donne la direction et le sens du courant dans chaque niveau. Dans la zone de balancement des marées où cette structure est particulièrement commune (REINECK et WUNDERLICH, 1968), le changement de sens de cette inclinaison traduit l'inversion des courants de flux et de reflux.

La microstratification entrecroisée et la structure madrée, fréquentes dans le Grès argileux, sont plus rares dans le Grès à meules. Elles n'apparaissent que vers le sommet de certains bancs de grès sains lorsque ceux-ci deviennent plus argileux. Ces niveaux sont, pour cette raison, rejetés par les carriers.

c) LITAGE DÉFORMÉ

Parfois, dans la masse d'un banc de grès sain, se rencontrent des lamines irrégulièrement contournées. Leur déformation résulte probablement de glissements sous-aquatiques.

C - Les figures sédimentaires

Les fluctuations des agents hydrodynamiques responsables du dépôt d'un matériel détritique se répercutent au niveau des interfaces et dans la masse des strates sous forme de figures sédimentaires. Leur description et leur interprétation furent surtout l'oeuvre, au cours des vingt dernières années, d'auteurs publiant en anglais (SHROCK, 1948 ; DZULYNSKI et SANDERS, 1962 ; BOUMA, 1962 ; POTTER et PETTIJOHN, 1963 ; DZULYNSKI, 1963 ; PETTIJOHN et POTTER, 1964 ; DZULYNSKI et WALTON, 1963, 1965 ; CONYBEARE et CROOK, 1968) et, plus rarement, en langue allemande (KREJCI-GRAF, 1932 ; RÜCKLIN, 1938). La terminologie utilisée reste donc essentiellement anglaise. La traduction de certains termes est difficile et se heurte à de nombreuses synonymies (CHAMBRE SYNDICALE DE LA RECHERCHE ET DE LA PRODUCTION DU PÉTROLE ET DU GAZ NATUREL, 1966). Dans ce cas, il convient de se référer à des descriptions et à des figurations de types (LANTEAUME, BEAUDOIN, et CAMPREDON, 1967).

Les figures sédimentaires sont particulièrement belles et abondantes dans le Grès à Voltzia. Elles n'ont pas encore fait l'objet d'un inventaire détaillé.

Suivant leur localisation, on distingue les figures de la face inférieure ou semelle des bancs, les figures situées dans la masse des grès et les figures de la surface supérieure des bancs.

1. FIGURES DES SEMELLES OU MURS DES BANCS (SOLE-MARKS)

Les figures des murs des bancs correspondent aux moulages naturels ou contre-empreintes (en anglais : casts) de dépressions ou de reliefs (en anglais : marks) de la strate sous-jacente de granulométrie plus fine. A l'origine, la plupart d'entre elles furent décrites dans le faciès flysch. Aujourd'hui, elles sont de plus en plus fréquemment citées dans d'autres formations détritiques. C'est le cas du Grès à Voltzia. Leur distribution dans des faciès très différents souligne l'étroite parenté des phénomènes qui ont présidé à la mise en place des sédiments.

D'après l'ordre chronologique d'apparition des figures des semelles des bancs, on peut distinguer :

- les figures qui renseignent sur la morphologie du niveau sous-jacent avant le dépôt du grès ;

- les figures provoquées par l'action mécanique du courant responsable du dépôt ;

- les figures dues à la déformation secondaire des strates après leur mise en place.

Dans cette succession, la place qui revient aux figures résultant de l'activité des êtres vivants est difficile à préciser. Elles sont généralement antérieures au dépôt du grès ; elles peuvent aussi lui être postérieures lorsque les organismes ont vécu dans l'interface grès-pélite.

a) FIGURES EN LIAISON AVEC LES CARACTÈRES PHYSIQUES DU NIVEAU SOUS-JACENT

Les marques de dessication - Les contre-empreintes des fentes de dessication qui ont affecté un niveau argileux forment un réseau polygonal caractéristique (Pl. XXXVI, fig. 2). Ces figures ne sont pas fréquentes. Leurs dimensions sont variables. On peut en observer deux générations successives sur une même surface.

102

Cônes à ramifications dichotomiques - L'empreinte qui correspond à cette figure avait la forme d'un entonnoir irrégulier et peu profond, de quelques décimètres de diamètre. Vers son fond convergeaient des sillons ramifiés plus ou moins dichotomiquement (Pl. XXXIV, fig. 1). Des sole-marks semblables ont été décrits dans le Permo-Trias des Etats-Unis et obtenus expérimentalement par BOYD et ORE (1963). Dans ce dernier cas, ils naissent à la surface d'un sédiment fin saturé d'eau, en l'absence de nappe d'eau superficielle, lorsque celui-ci est traversé par un jet d'eau dirigé de bas en haut. L'origine de ce courant d'eau ascendant n'est pas clairement expliqué par les auteurs. Pour des figures voisines, ALLEN (1961) a invoqué la compaction de la vase et un mécanisme artésien. Il est possible, en effet, que de telles figures apparaissent à la suite d'une évacuation verticale de l'eau d'essorage du sédiment dans des points bas de la topographie.

b) FIGURES DUES AU COURANT

Ces figures peuvent naître directement lorsque le courant affouille un sédiment encore meuble ou, indirectement, par l'intermédiaire d'objets entraînés sur le fond. Ces figures sont précieuses pour l'étude des paléocourants.

Les figures d'affouillement ou scour-marks (DZULYNSKI et SANDERS, 1962)

Les scour-marks proviennent de l'érosion du substratum par des courants de suspension. Les contre-empreintes des dépressions ainsi formées constituent les figures sédimentaires les plus communes.

Les flute-marks (MAXSON et CAMPBELL, 1935) - La contre-empreinte correspondant à cette figure ou flute-cast, est de forme oblongue. L'une des extrémités est renflée en bulbe, tandis que l'autre se raccorde progressivement à la surface du sédiment. Leur longueur moyenne est de quelques centimètres. Les flute-marks se rencontrent rarement à l'état isolé. Généralement ils sont groupés par faisceau (Pl. XXXIV, fig. 2). RÜCKLIN (1938) admettait que ces figures naissaient dans les zones de grande turbulence, sous l'effet d'un courant tourbillonnaire. DZULYNSKI et WALTON (1963) le confirmèrent expérimentalement. La formation d'un flute-mark se fait par un mécanisme d'érosion régressive ; la partie renflée de la contre-empreinte indique ainsi le côté amont. La forme des flute-casts est variable : elle peut être plus ou moins aplatie et la partie renflée peut présenter un profil hélicoïdal plus ou moins accusé.

Les sillons d'érosion ou gouge-channels (KUENEN, 1957) - Ce sont des gouttières creusées dans le substratum par le courant. Leur forme et leurs dimensions sont extrêmement variables. Leur tracé est rarement rectiligne et peut se compliquer de figures sédimentaires accessoires (Pl. XXXIV, fig. 3). Lorsque le sédiment érodé consiste en lamines de durétés différentes, la contre-empreinte du sillon montre à sa surface une structure en terrasses à la suite d'un mécanisme d'érosion différentielle.

Les figures de ruissellement ou rill-marks (SHROCK, 1948) - Ce sont des sillons finement ramifiés qui naissent sur les plages actuelles lors du retrait de la marée. Ils divergent généralement vers l'aval. Dans le Grès à meules, ces figures sont rares.

Les figures provoquées par des objets ou tool-marks (DZULYNSKI et SANDERS, 1962)

Il s'agit de figures produites par un objet transporté par le courant qui érafle ou burine le substratum.

Les cannelures d'érosion ou groove-marks (SHROCK, 1948) - Ce sont des cannelures parfaitement rectilignes, pouvant atteindre plusieurs mètres de longueur. Elles sont beaucoup plus étroites que les sillons d'érosion (quelques centimètres). La surface de leur contreempreinte ou groove-cast est marquée de stries longitudinales. Les deux extrémités s'estompent progressivement (Pl. XXXIV, fig. 4). On attribue les groove-marks au trainage sur le fond d'objets divers : végétaux, galets, cadavres ... Ils indiquent la direction du courant, mais pas son sens.

Les figures d'impact - Ces figures sont engendrées par un objet qui ricoche sur le fond ou qui s'y implante. Suivant la nature de l'objet et suivant son angle d'impact, on peut obtenir une grande variété d'aspects. Par saltation répétée ou par roulement d'un objet sur le fond, peuvent naître des figures présentant une certaine périodicité. Il est difficile de classer ces tool-marks. Quelques figures ont cependant une géométrie bien caractérisée. Il en est ainsi des brush-marks (DZULYNSKI et SLACZKA, 1958) ou figures en fer à cheval : l'emboutissage d'un objet dans un substratum mou a créé, en aval de l'impact, un ou plusieurs bourrelets convexes.

c) FIGURES DE DÉFORMATION

La plupart des contre-empreintes décrites ci-dessus ont été ultérieurement comprimées et déformées par la charge du sédiment. Elles deviennent des load-casts (KUENEN, 1953). On a ainsi des loaded-flutes, des loaded-grooves... Il n'est généralement pas possible d'apprécier la part qui revient à ce phénomène dans une figure donnée.

Parfois le grès s'enfonce dans le sédiment sous-jacent sous forme de miches ou pseudonodules (MACAR, 1948). Ces figures correspondent aux ellipsoides signalés par les auteurs anciens dans le Grès argileux de la carrière de Soultz-les-Bains (p. 89). Elles seraient provoquées par un phénomène de thixotropie dans un sédiment saturé d'eau. Elles ont été réalisées expérimentalement par KUENEN (1958).

d) TRACES D'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE

La surface inférieure des bancs de grès révèle une foule d'empreintes qui recoupent au hasard la direction du courant : griffures, pistes, empreintes de pas ... Les traces les plus caractéristiques ont été décrites dans le chapitre consacré aux témoins de l'activité biologique (p. 68)

La distribution des figures sédimentaires au mur d'une lentille de grès sains ne semble pas quelconque. La partie axiale est généralement plus lisse et comporte essentiellement des tool-marks et des traces d'activité biologique. Les figures d'érosion et de déformation sont, par contre, plus fréquentes vers les bords du corps gréseux.

2. FIGURES OBSERVABLES À L'INTÉRIEUR DES BANCS

Ces figures se repèrent plus difficilement que celles des toits ou des murs des bancs. Ce sont essentiellement des figures dues au courant.

a) La linéation de délit ou parting-lineation (CROWELL, 1955)

A la surface des plans de litage, le grès s'écaille fréquemment suivant des esquilles allongées dont les grands axes sont parfaitement parallèles entre eux (STOKES, 1947; POTTER et MAST, 1963; ALLEN, 1964). L'aspect rappelle celui de l'écorce de certains platanes (Pl. XXXV, fig. 1). Ce délit singulier est dû à l'orientation et à l'imbrication des grains de la roche lors de sa mise en place par un courant. Des figures semblables s'observent sur les plages de sable actuelles (ALLEN, 1964, 1968 b).

b) Les cupules en croissant ou crescent-marks (PEABODY, 1947)

Ces figures sédimentairs sont des dépressions en fer à cheval qui s'observent sur le toit des lamines. Dans l'axe de la figure persiste une zone en relief (Pl. XXXV, fig. 2). Les crescent-marks se forment lorsqu'un courant est gêné par un obstacle : galet, coquille ... Il affouille alors le sédiment autour de l'objet qui demeure perché sur un socle.

Contrairement aux brush-casts des semelles des bancs, la partie convexe des cupules est orientée vers l'amont.

c) Tool-marks

La surface des lamines présente souvent de petites rainures parallèles à la direction du courant. Elles ont probablement été provoquées par des impacts d'objets.

d) Les figures de tourbillons ou whirl-balls (DZULYNSKI et al., 1956)

Au cours des travaux d'exploitation, des cônes gréseux irréguliers s'isolent parfois dans la masse d'un banc de grès. L'axe de ce corps est perpendiculaire à la stratification, la partie élargie étant tournée vers le haut. Sa longueur peut dépasser 50 cm. La surface est marquée de constrictions hélicoïdales (Pl. XXXII, fig. 2). Les whirl-balls prendraient naissance par remplissage de cavités formées par des tourbillons.

e) Les figures de déformation

Fréquemment, les toits des lamines sont couverts de fines rides, longues de quelques centimètres, qui recoupent les autres figures sédimentaires (Pl. XXXV, fig. 3). La constance

de leur orientation et leur densité donnent l'impression que les lamines ont été frippées après leur dépôt. Ces rides correspondent vraisemblablement à des déformations postsédimentaires.

3. LES FIGURES DU TOIT DES BANCS

La surface supérieure des bancs de grès sains n'est pas toujours conservée. Elle est souvent tronquée par le banc surincombant. Lorsqu'elle a été préservée à la faveur d'un niveau argileux protecteur, elle offre un magnifique tableau de plage fossile (Pl. XXXII, fig. 1). Sur cette surface, les ripple-marks sont en effet les figures sédimentaires dominantes.

a) LES RIDES SOUS-AQUATIQUES OU RIPPLE-MARKS

Une importante bibliographie a été consacrée à la classification et à la genèse des ripplemarks (EVANS, 1941 ; VAN STRAATEN, 1953 ; REINECK, 1961 ; ELLIOTT, 1964 ; ALLEN, 1968 b).

Dans le Grès à meules se rencontrent deux catégories de rides sous-aquatiques : les rides d'oscillation et les rides de courant. Elles se compliquent souvent par des phénomènes d'interférence lorsque des courants d'orientation différente ont remodelé les rides préexistantes.

Les rides d'oscillation ou rides de vagues

Ce sont des rides simples à profil symétrique. Les crêtes sont rectilignes et parallèles. L'espace entre deux crêtes consécutives ou longueur d'onde mesure de 3 à 7 cm. L'amplitude, c'est-à-dire la hauteur des crêtes, est faible : 5 mm en moyenne. Cette dernière mesure est affectée par l'érosion des crêtes et le tassement du sédiment. Les ripple-marks d'oscillation naissent sous l'effet d'ondes stationnaires provoquées par la houle. Es sont l'indice d'eau peu profonde car leur formation exige que le mouvement des vagues se fasse sentir sur le fond (REINECK, 1961).

Les rides de courant

Ce sont les ripple-marks les plus fréquents à la face supérieure des grès sains. Ils sont liés au transport du sédiment : ils progressent sur le fond, leur crête restant perpendiculaire à la direction du courant. Leur profil est dissymétrique. La pente la plus douce est dirigée vers l'amont (Fig. 23). En coupe, on reconnait la succession caractéristique des feuillets obliques (REINECK, 1961).

Dans le Grès à Voltzia, quatre types de rides de courant ont été reconnus.

Les rides de courant à crêtes rectilignes continues et parallèles -Leur profil ne permet pas toujours de les distinguer des rides d'oscillation asymétriques, leur mensurations étant comparables. Cependant, si l'affleurement est suffisamment altéré, on reconnaît l'empilement de lamines obliques.

Les rides linguoides - Ce sont les ripple-marks les plus communs. Chaque figure se développe indépendamment de la voisine. Elle a la forme d'une langue de quelques centimètres de large. Le côté abrupt, situé sous le courant, est convexe (Fig. 23 B, a).

Les rides en croissant - Elles ont l'aspect de petites dunes éoliennes du type barkane. Le côté abrupt de la ride est concave (Fig. 23 B, b).

Les rides de grande taille - En 1969, l'exploitation R. Reinberger (carrière n° 9 de l'Annexe I) dégagea dans le Grès à meules une importante surface structurale couverte de rides linguoïdes. De place en place, elle était interrompue par des dépressions peu profondes, larges de 2 à 3 mètres, ayant la forme d'un U ouvert vers l'aval. Le fond de ces cuvettes était tapissé de ripple-marks en disposition plus ou moins concentrique (Pl. XXXII, fig. 1). L'aspect est en tout point semblable aux "lunate largescale ripples" ou rides en croissant de grande taille décrites et figurées par ALLEN (1968 b, p. 83, fig. 4.38). Les dimensions de l'affleurement n'ont malheureusement pas permis de vérifier s'il s'agissait effectivement de figures répétées rythmiquement. La surface de ces dépressions était criblée de petites cupules à contour anguleux de 3 à 4 mm de diamètre. L'un de leurs côtés présente un bourrelet d'impact. Des figures identiques ont été interprétées par SHROCK (1948, fig. 102) comme des impacts de grelons.



A. - Profil et structure interne B. - Rides simples à crêtes discontinues : a) ride linguoïde b) ride en croissant

Les champs de ripple-marks du toit des bancs recoupent souvent obliquement le litage du grès. Cela implique un changement du régime hydrodynamique entre le dépôt des lamines et l'élaboration de la surface structurale.

b) LES FIGURES DE TASSEMENT

La surface des champs de ripple-marks est souvent découpée en petits compartiments dont le décalage vertical reste de l'ordre du millimètre. Ce décalage n'interesse que la pellicule superficielle du banc. Les lignes qui délimitent les compartiments ont un tracé courbe et se recoupent plus ou moins à angle droit.

Ces figures proviennent vraisemblablement du tassement du sédiment.

c) LES TRACES D'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE

Le toit des bancs de grès est une surface structurale. Il correspond soit à un arrêt de sédimentation, soit à un changement de nature de celle-ci. Il est riche en traces d'activité organique. Mais, imprimées dans un sédiment plus grossier, elles sont plus difficilement déterminables que celles de la semelle des bancs. Cependant, au sommet du Grès à meules, des terriers d'organismes fouisseurs et des racines de végétaux fournissent un précieux horizon repère (p. 145).

En dehors des figures sédimentaires décrites précédemment, et indépendamment des chenaux qui seront étudiés dans le prochain chapitre, la topographie du toit des bancs de grès sain se révèle très tourmentée : des sillons et des seuils de dimensions variables s'y développent (Pl. XXXI, fig. 4). Ils transmettent une image fidèle de la paléotopographie du Grès à meules.

III – CARACTÈRES PALÉONTOLOGIQUES DES GRÈS SAINS

La base des bancs de grès sains renferme fréquemment des restes végétaux et des débris d'ossements. Par ailleurs, dans toute la région étudiée, le Grès à meules se termine par un horizon bioturbé avec des terriers d'organismes fouisseurs et des racines in situ (GALL et GRAUVOGEL, 1967 c).

En-dehors de ces deux cas, les grès sains sont caractérisés par l'absence de tout fossile figuré. Cependant, des niveaux argileux ou carbonatés à faune saumâtre ou marine sont étroitement imbríqués entre les bancs de grès sains. Is seront étudiés au cours des prochains chapitres. Cette association de faciès est fondamentale pour interpréter le milieu de dépôt du Grès à meules.

IV – INTERPRÉTATION DU MILIEU DE DÉPOT DES GRÈS SAINS

1. LE CADRE HYDRODYNAMIQUE

A la suite des travaux expérimentaux de GLBERT (1914) et des études de GLANGEAUD (1938, 1939, 1941) sur le transport des sédiments en milieu aquatique, deux mécanismes fondamentaux ont été distingués :

- le transport par suspension lorsque la résultante verticale du courant est suffisante pour vaincre la chute des particules sur le fond. Par suite de la turbulence du milieu, le trajet des particules est capricieux ;

- le transport par traction lorsque les particules sont entraînées sur le fond. Elles s'y déplacent par roulement ou par saltation suivant des directions parallèles à l'écoulement du courant.

Les structures et les figures sédimentaires sont directement conditionnées par ces deux modes de transport (SIMONS et RICHARDSON, 1962 ; BOUMA, 1962 ; SANDERS, 1963 ; ELLIOT, 1965 ; HARMS et FAHNESTOCK, 1965 ; ALLEN, 1963, 1968 a, 1969 ; R.G. WALKER, 1967). Ainsi, pour une classe granulométrique donnée et à partir d'une vitesse moyenne compétente (MENARD, 1950) capable de mettre ces particules en mouvement, on peut reconnaître plusieurs régimes hydrodynamiques (Fig. 24).

a) Pour des courants de traction de compétence moyenne, le déplacement des matériaux sur le fond induit la formation de ripple-marks.

b) A des vitesses d'écoulement plus élevées, les rides disparaissent et une surface plane se trouve réalisée. Les lamines horizontales naissent dans le sédiment par suite de fluctuations mineures du courant. La linéation de délit peut apparaître (ALLEN, 1964). Les figures sédimentaires sont essentiellement des tool-marks étirés dans le sens de la direction du courant.

c) Pour les régimes d'écoulement de forte turbulence, qui correspondent aux courants de suspension, prennent naissance des bancs massifs homogènes ou granoclassés. Les phénomènes d'érosion prédominent et provoquent la formation de scour-marks du type flute-marks. Ces figures sédimentaires ont été obtenues expérimentalement par DZULYNSKI et WALTON (1963) dans de tels environnements hydrodynamiques.

Lors de la mise en place d'un banc de grès sain, ces trois régimes d'écoulement se sont succédé au cours du temps.

En effet, la base des bancs est localement ravinante avec des scour-marksbien développés. La roche est massive avec des galets et des restes végétaux. Elle dénote l'intervention d'un courant de suspension. La masse du grès, formée de lamines à parting-lineation et tool-marks, correspond à un régime moins turbulent. Celui-ci favorise l'étalement du sédiment et l'élimination de la fraction pélitique. Le milieu est encore suffisamment agité pour empêcher l'installation d'organismes vivants. Au sommet des bancs, l'apparition de ripple-marks marque l'affaiblissement définitif du courant. La fossilisation des rides et le passage à une sédimentation pélitique indiquent des conditions physiographiques nouvelles.

STRUCTURE DU SÉDIMENT	MECANISME DE MISE EN PLACE	Régime d'écoulement
Lamines horizontales (terme supérieur)	Décantation des particules pélitiques	régime
Lamines obliques et faisceaux entrecroisés de lamines obliques	Formation de ripple – marks et de dunes	Bos
Lamines horizontales (terme inférieur)	Transport des particules par traction	
Sédiment massif homogène ou granoclassé	Transport des particules par suspension Formation d'anti – dunes	Haut régime

Figure 24 - Relations entre les structures sédimentaires et le régime hydrodynamique. La compétence du courant décroit de bas en haut (modifié d'après R.G. WALKER, 1967).

Le dépôt d'une lentille gréseuse fut donc un phénomène continu. La relative constance des paléocourants relevés au sein d'un même banc confirme cette conclusion.

La succession verticale des structures et des figures sédimentaires permet ainsi de comprendre la dynamique de la mise en place d'un banc de grès sain. Un courant transportant du matériel détritique fin fait brutalement irruption dans une aire de sédimentation. Il abandonne progressivement sa charge au fur et à mesure que sa compétence diminue. Ensuite s'installe un milieu de basse énergie.

2. L'ENVIRONNEMENT SÉDIMENTAIRE

Un banc de grès sain représente une unité d'analyse du Grès à meules. Ce corps sédimentaire est en effet limité dans l'espace par sa forme lenticulaire et dans le temps par sa base ravinante et son toit couvert de ripple-marks (Fig. 25). A l'échelle d'observation près, il rappelle les "cordons" décrits dans les grès de l'Unité IV du Cambro-Ordovicien des Tassilis (BEUF, MONTADERT et DEBYSER, 1962).

Le caractère principal des grès sains est l'existence d'un fin litage plan-parallèle et subhorizontal, généralement associé à une linéation de délit. Les observations faites sur différents environnements sableux actuels ont permis de mieux comprendre la genèse de telles lamines.

a) L'environnement marin

D'une manière générale, le déferlement des vagues sur les plages provoque l'étalement et le vannage des sables. A la suite des variations météorologiques, des lamines prennent alors naissance. Une lamine résulte de l'action d'un nombre indéterminé de vagues (THOMSON, 1937 ; Mc KEE, 1957). Quelques heures ou plusieurs jours peuvent être nécessaires pour l'édifier.

Les zones intertidales sont soumises à la périodicité des marées. La succession des hautes et des basses mers contribue au dépôt d'un sédiment où alternent les niveaux sableux et les niveaux pélitiques (RICHTER, 1928 ; LÜDERS, 1930 ; OTVOS, 1965 ; REINECK et WUNDERLICH, 1967). Le dépôt d'une lamine correspond alors exactement à la durée d'une marée.

b) L'environnement deltaïque

Dans la région proximale des deltas, lorsque les eaux fluviatiles se trouvent freinées par une nappe d'eau, mer ou lac, la charge sédimentaire se dépose. Des lamines naissent à la suite des fluctuations des apports du fleuve (JOHNSTON, 1922; Mc KEE, 1939; VAN STRAATEN, 1959; FISK, 1961; COLEMAN et GAGLIANO, 1965; FÖRSTNER, MÜLLER et REINECK, 1968).

c) L'environnement fluviatile

Lors des périodes de crues, la sédimentation fluviatile peut également produire un litage plan-parallèle et subhorizontal (HARMS et al., 1963; VISHER, 1965; ALI EN, 1965; Mc KEE et al., 1967).



Figure 25 - Bloc-diagramme d'un corps de grès sain.A. Face supérieure à ripple-marksB. Surface à linéation de délitD et D'. Coupe longitudinale et transversale des laminesLa flèche indique la direction du courant.

Dans tous les cas, les lamines plan-parallèles et subhorizontales naissent dans des eaux peu profondes. Il leur correspond des milieux de haute énergie qui favorisent l'élimination de la fraction fine du sédiment. La sédimentation y est rapide. C'est là une différence fondamentale avec le litage régulier des varves dont le caractère rythmique est l'expression de cycles saisonniers.

De tous les milieux évoqués, c'est l'environnement deltaïque qui s'accorde le mieux avec les conditions de dépôt des grès sains.

En effet, l'imbrication des bancs de grès sains avec des lentilles argileuses ou carbonatées à faune saumâtre ou marine exclut l'éventualité d'un environnement purement fluviatile. Cependant, ils sont toujours étroitement associés au faciès continental des grès à plantes. Ainsi, si les influences marines restent sensibles, le continent demeure le grand pourvoyeur du matériel détritique. La rencontre de ces deux environnements caractérise les embouchures des systèmes fluviatiles.

3. LE FACIÈS DES BARRES D'EMBOUCHURE

La sédimentation au niveau des embouchures fut plus particulièrement analysée dans le cas du delta du Rhône (DUBOUL-RAZAVET, 1956). L'affaiblissement de la pente du lit et la rencontre d'une langue d'eau marine en profondeur provoquent la décharge des matériaux transportés par le fleuve. Ainsi naît une "barre d'embouchure" qui tend à obstruer le passage vers la mer. Elle est entaillée de passes qui permettent l'évacuation des eaux douces. La barre peut émerger sous forme d'île ou évoluer en plage. BERTHOIS et HOORELBECK (1966) ont cité un dispositif analogue dans certains estuaires de la Guyane française. Toutes proportions gardées, un mécanisme comparable contribue à la formation des "bar-finger sands" du delta du Mississippi (FISK et al., 1954 ; SHEPARD, 1960 ; FISK, 1961).

L'interprétation des bancs de grès sains comme un dépôt de barres d'embouchure est satisfaisante à plus d'un égard. En effet, la barre est soumise à la double action, souvent antagoniste, du fleuve et de la mer. Lors des crues, les apports continentaux l'engraissent. Aux périodes d'étiage, les vagues et les marées la remanient ou la démantèlent (ROMASHIN, 1967 ; MIKHAYLOV, 1967). Ainsi s'expliquent les fréquents ravinements synsédimentaires au sein des bancs. En particulier, la discordance maintes fois observée entre les lamines et la surface structurale à ripplemarks se comprend aisément : lorsque les apports fluviatiles se ralentissent ou cessent, le sédiment fraîchement déposé n'est plus soumis qu'à l'action des vagues. La belle régularité de certaines lamines pourrait également traduire l'influence des marées.

La constante agitation du milieu aquatique se répercute d'autre part sur la granulométrie du dépôt. Les particules sont triées et régulièrement dispersées de sorte qu'à l'échelle du banc on n'observe guère le granoclassement vertical si commun dans les dépôts fluviatiles. <u>La diminution de la compétence du courant se traduit davantage dans la succession des structures sédimentaires que dans la décroissance de la granulométrie.</u>

L'énergie du milieu empêche par ailleurs l'installation d'une faune benthique. Celle-ci ne s'épanouit qu'à la suite d'un changement brutal du régime hydrodynamique, lorsque, dans un chenal abandonné ou dans une dépression topographique, se réalise une nappe d'eau plus calme. Alors les particules argileuses se décantent et les carbonates précipitent.

CHAPITRE 2

LES GRÈS À PLANTES

A l'affleurement, les grès à plantes représentent une fraction peu importante du Grès à meules. Ils sont étroitement interstratifiés entre les grès sains. Certains auteurs ont voulu leur reconnaître une signification chronostratigraphique (MÜLLER et SCHRÖDER, 1960 ; PERRIAUX, 1961). En particulier, un "horizon à plantes de base" (PERRIAUX, 1961, p. 83) délimiterait le Grès à Voltzia par rapport aux Couches intermédiaires. S'il est vrai que, statistiquement, les grès à plantes sont plus abondants dans la partie inférieure du Grès à meules, ils ne représentent en fait qu'un faciès bien particulier se rencontrant à tous les niveaux du Grès à Voltzia inférieur.

I – DESCRIPTION PÉTROGRAPHIQUE

Les grès à plantes sont de couleur gris verdâtre (HUE 5 Y 6/2 et HUE 10 Y 5/2 de la Charte internationale des couleurs des roches) ou beige jaunâtre (HUE 10 Y R 5/4). Ils sont exceptionnellement roses.

1. GRANULOMÉTRIE

Les caractères pétrographiques des grès à plantes sont très variables. On y rencontre tous les intermédiaires entre des grès argileux, des grès fins et de véritables poudingues intraformationnels.

La présence de galets reste le caractère dominant. Il s'agit essentiellement de galets plats d'argilite verte, plus rarement rouge. Leurs dimensions peuvent être considérables (plusieurs décimètres de diamètre). Il est probable qu'une fragmentation préalable d'un dépôt pélitique sous l'effet de la dessication a préparé la formation de ces galets (BERTHOIS, 1952). Des galets jaunâtres de grès dolomitique, de taille plus modeste et à contour plus anguleux, s'y mêlent fréquemment.

L'étude granulométrique de la fraction gréseuse des grès à plantes fait souvent apparaître une dispersion bimodale des particules (Fig. 20). Elle dénote l'hétérogénéité du sédiment provenant de sources multiples. Celle-là s'exprime également dans le coefficient de classement dont les valeurs sont supérieures à celles des grès sains (Tableau III). Par suite de la présence de galets, le classement des grès à plantes est mauvais.

Le grain moyen de la roche est toujours plus fort que dans les autres faciès du Grès à Voltzia (0,16 à 0,20 mm).

2. COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

La composition minéralogique de la fraction gréseuse des grès à plantes est proche de celle des grès sains (p. 97). Le tableau V donne les pourcentages relatifs des différents constituants.

Cependant, par rapport aux grès sains, les teneurs en quartz sont plus faibles. Celles-ci représentent normalement moins de 50 % des éléments figurés de la roche. Par contre, les feldspaths et les micas sont plus abondants. Quartz et microcline montrent des indices de nourrissage diagénétique.

TABLEAU V

Composition minéralogique (en %) de quelques échantillons de grès à plantes. La fraction indosée concerne les galets, les grains lithiques, les restes organiques, les amas phylliteux et divers minéraux accessoires.

Référence de l'échantillon	Localité	Quartz	Microcline	Muscovite	Biotite	Ciment pélitique	F raction indosée
112	Waldhambach	44	26	2	1	5	22
121	Adamswiller	41	33	1,50	1	4	19,50
123	Adamswiller	47	28	3,50	3	5,50	13
L1	Lohr	52	32	2,50	1	5	7,50
122	Hangviller	49	27	2	1,50	4,50	16

Le ciment pélitique est également plus abondant que dans les grès sains. Souvent ils s'accroît progressivement au sein d'un profil. A un grès massif succède alors un grès de plus en plus argileux (Fig. 26). L'importance prise par la fraction argileuse et par les micas ainsi que la présence de galets classent les grès à plantes parmi les grès "immatures" de la terminologie de FOLK (1951). Il s'agit d'un matériel détritique peu évolué. L'origine de certains galets est d'ailleurs proche, car les niveaux dont ils sont issus ont parfois été retrouvés en place.

En résumé, les grès à plantes constituent un sédiment plus grossier et plus mal trié que les grès sains.

3. COMPOSITION CHIMIQUE

Les analyses chimiques ont porté sur 13 échantillons de grès à plantes provenant de différentes localités. Les résultats sont homogènes et voisins de ceux des grès sains. Ils sont donnés par le tableau XX. Ils seront discutés dans le chapitre D consacré à l'étude géochimique du Grès à Voltzia.

II – STRATONOMIE DES GRÈS À PLANTES

A - LA STRATIFICATION

Les grès à plantes forment le remplissage de chenaux du Grès à meules. La largeur de ces chenaux varie de 1 mètre à une dizaine de mètres. Leur extension est donc nettement inférieure à celle des corps de grès sains. La pente des chenaux demeure toujours faible, de l'ordre de quelques degrés. L'inclinaison des flancs est peu accusée. Elle est cependant suffisante pour reconstituer la direction des paléocourants (p. 165). Sur le front de taille, la section des chenaux apparaît régulièrement concave. Dans certains cas pourtant, elle est nettement asymétrique, un flanc étant plus abrupt que l'autre. Cette particularité caractérise les méandres.

Les grès à plantes occupent normalement la totalité du chenal. Ils peuvent aussi y constituer des langues gréseuses séparées par un remplissage pélitique (Pl. XXXI, fig. 1).

B - LE LITAGE

Les grès à plantes ne présentent jamais la belle régularité des lamines planes, parallèles et subhorizontales des grès sains. Il peut n'y avoir aucun litage apparent. La roche prend alors un aspect massif. Il existe souvent un litage oblique. Les lamines ont une épaisseur de plusieurs centimètres. Leur sommet est souligné par des débris végétaux et des lamelles de micas (Pl. XXXII, fig. 4). Vers la partie supérieure du remplissage du chenal, les grès à plantes se chargent fréquemment en matériel argileux. Les lamines deviennent plus fines et la structure madrée apparaît (Fig. 26).

Dans le cas d'un chenal à section asymétrique, les grès à plantes sont surtout localisés sur le flanc le moins abrupt. Ils y forment des faisceaux de lamines obliques. Ils sont l'équivalent des dépôts de la rive convexe ou barres de méandre (point bar des auteurs de langue anglaise) des chenaux à parcours sinueux (ALLEN, 1965). Il n'est pas rare de rencontrer des fragments de plantes qui recoupent obliquement ou verticalement le litage. C'est là l'indice d'une sédimentation extrêmement rapide.

L'absence de litage fin et régulier et la présence de galets et de végétaux rendent les grès à plantes impropres à la taille. Ils ne sont utilisés que pour la confection de moellons.





C - LES FIGURES SÉDIMENTAIRES

La partie supérieure ou toit des grès à plantes est rarement bien délimitée. Elle s'enrichit souvent progressivement en matériel pélitique. Puis l'ensemble est érodé par les grès surincombants. La face inférieure ou mur des bancs est ravinante. Lorsque la roche érodée est un grès, aucune figure particulière ne s'observe. Le fond du chenal présente alors une surface irrégulière tapissée par les cavités d'implantation des galets. Au contraire, lorsque les grès à plantes sont en contact avec un niveau argileux, on rencontre un riche cortège de figures sédimentaires. La plupart de ces sole-marks ont été décrits en détail dans le chapitre précédent. On peut les réunir en deux catégories.

NE

a) LES FIGURES REFLÉTANT LES CARACTÈRES PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DU NIVEAU SOUS-JACENT

Leur conservation présuppose que le substratum pélitique était déjà partiellement consolidé avant le dépôt du grès. En raison du caractère fortement ravinant des grès à plantes, ces figures sont exceptionnelles.

Les pseudomorphoses de cristaux de sel - Ce sont des empreintes en forme de Y, de quelques millimètres de côté (Pl. XXXVI, fig. 1). Une observation plus attentive montre que les trois branches correspondent aux arêtes d'un cube. Des figures analogues ont été interprétées comme résultant du remplissage de cavités provoquées à la surface d'un niveau pélitique par la cristallisation de sel gemme (SHROCK, 1948). Les cristaux ont été redissous avant le dépôt du grès (COUREL, 1962).

Les traces d'activité biologique - Elles sont difficiles à interpréter. Ce sont les contre-empreintes de pistes diverses, de griffures ...

b) LES FIGURES DUES AU COURANT

SE

Il s'agit essentiellement de figures d'affouillement (scour-marks) : flute-marks et gougechannels. Les figures provoquées par des objets transportés par le courant (tool-marks), par exemple des cannelures d'érosion (groove-marks), sont moins fréquentes.

Le caractère ravinant des grès à plantes se manifeste également sur les bords des chenaux lorsqu'ils sont en contact avec un niveau argileux. Ils émettent alors dans le banc pélitique des langues d'affouillement dont le déportement progressif vers l'extérieur témoigne de l'extension latérale du chenal au cours du temps (Fig. 27). Lorsque le niveau argileux ainsi érodé est com-

NW



Observations faites en juillet 1967.

posé d'une alternance de lamines de dureté différente, leur érosion différentielle fait apparaître sur le grès une structure en terrasses.

III – PALÉONTOLOGIE DES GRÈS À PLANTES

Malgré leur nature allochtone, les grès à plantes renferment des restes fossiles bien conservés.

1. LA FLORE

L'abondance des vestiges végétaux est caractéristique des grès à plantes. Par ordre de fréquence, les plantes rencontrées sont les suivantes :

Equisetites sp. Anomopteris mougeoti BRONGN. Schizoneura paradoxa SCHIMP. et MOUG. Voltzia heterophylla BRONGN. Voltzia sp. Yuccites vogesiacus SCHIMP. et MOUG. Neuropteridium sp. Albertia sp.

Ces fossiles se rencontrent normalement à l'état dissocié. Mais leur taille est parfois impressionnante, pouvant atteindre plusieurs mètres de longueur (Pl. XXXII, fig. 3). Dans certains cas, des exemplaires entiers d'Anomopteris avec rhizome et frondes ont pu être dégagés. Leur lieu de croissance était donc proche.

2. LA FAUNE

La faune des grès à plantes est uniquement constituée par des ossements de Vertébrés. Il s'agit généralement de fragments indéterminables. Plusieurs échantillons cependant ont pu être attribués à des Stégocéphales de la famille des Capitosauridés. Il s'agit donc d'Amphibiens, c'est-à-dire d'êtres dont les premiers stades de développement se déroulent dans les eaux douces. Ils confirment l'origine fluviatile des grès à plantes.

IV – INTERPRÉTATION DU MILIEU DE DÉPÔT DES GRÈS À PLANTES

Par leur mode de gisement et leur nature conglomératique, les grès à plantes représentent un matériel strictement allochtone. Aucun triage important n'est intervenu après leur mise en place. D'après les restes organiques qui les accompagnent, il s'agit d'atterrissements détritiques venus du continent. Le dépôt fut rapide, comme en témoignent certains végétaux recoupant verticalement le litage de la roche. Il est l'oeuvre d'un courant dont la compétence diminuait progressivement, provoquant un accroissement de la fraction argileuse de la base vers le sommet du remplissage des chenaux. Ces caractères sont ceux des dépôts fluviatiles (ALLEN, 1965 ; VISHER, 1965 ; POTTER, 1967). Chaque lentille de grès à plantes est la conséquence d'une crue. Dans un même apport sont alors réunis en vrac des matériaux d'origine diverse, arrachés par le passage des eaux. Après dépôt, s'installe une nappe d'eau plus tranquille.

Le faciès des grès à plantes est étroitement associé à celui des barres d'embouchures défini précédemment. La base des bancs de grès sains renferme en effet souvent, sur une certaine épaisseur, des galets et des restes végétaux. Sur une même verticale, le passage d'un faciès à l'autre se trouve réalisé par une libération plus importante de la fraction argileuse, par l'élimination des galets et des vestiges organiques et par une usure mécanique plus accentuée du matériel gréseux. Les grès sains résultent donc du remaniement et du vannage des grès à plantes.

Les grès à plantes correspondant à un dépôt plus franchement fluviatile que les grès sains, fournissent des indications précieuses sur l'arrière-pays du Grès à meules. Les galets pélitiques et dolomitiques prouvent l'existence, en amont de l'embouchure, d'étendues d'eaux où s'effectuait une sédimentation argileuse ou carbonatée. Une riche végétation prospérait au voisinage des cours d'eau. Elle consistait essentiellement en équisétales et en fougères. Les rives étaient peuplées d'Amphibiens. L'absence d'Invertébrés n'est qu'apparente car ils résistaient moins bien à un transport prolongé.

Ce paysage correspond à celui des plaines d'épandage, si souvent évoquées pour interpréter les grandes séries détritiques du type molasse, sur lesquelles divaguaient des cours d'eau au gré des apports continentaux.

CHAPITRE 3

LES NIVEAUX ARGILEUX

Des lentilles de sédiment argileux se rencontrent fréquemment dans le Grès à meules. Elles forment le remplissage de chenaux ou les interstrates qui séparent deux bancs de grès. Leurs couleurs dominantes sont le gris vert (HUE 5 Y 3/2 et HUE 5 Y 5/2 de la Charte internationale des couleurs des roches), le vert olive (HUE 10 Y 4/2 et HUE 10 Y 5/2) et le rouge brun (HUE 5 R 4/2).

L'étude des niveaux argileux est particulièrement intéressante car c'est d'eux que provient l'essentiel des connaissances paléontologiques sur le Grès à Voltzia.

I – SÉDIMENTOLOGIE DES NIVEAUX ARGILEUX

A - Caractères stratonomiques

1. MODE DE GISEMENT

Les niveaux argileux du Grès à meules ont une extension horizontale faible. Lorsqu'ils occupent l'emplacement d'anciens chenaux, ils forment des lentilles qui dépassent rarement 20 mètres de largeur. Cette dimension devient plus importante lorsqu'ils constituent les interstrates entre deux bancs de grès.

L'épaisseur des niveaux argileux est extrêmement variable. En moyenne, elle est de l'ordre de quelques décimètres. Le contact des niveaux argileux avec le banc sous-jacent se fait normalement sans transition. Il correspond à une discontinuité de sédimentation dénotant un changement brusque des conditions hydrodynamiques du dépôt. Le sédiment argileux épouse fidèlement la topographie du substratum. Celle-ci consiste souvent en un champ de ripple-marks,

La partie sommitale des niveaux argileux est généralement érodée par le sédiment surincombant. Dans quelques cas cependant, le dépôt a été intégralement conservé, révélant à sa face supérieure de nombreuses figures sédimentaires. Celles-ci s'observent aisément au niveau des semelles des bancs de grès qui surmontent directement la lentille argileuse. Comme on l'a vu dans les chapitres précédents, il s'agit soit de traces d'activité biologique, soit de fentes de dessication et, plus rarement, de pseudomorphoses de cristaux de sel gemme. Elles prouvent que le dépôt argileux était déjà compacté avant l'arrivée du matériel gréseux.

2. LES LAMINES

Les niveaux argileux sont lités horizontalement. Même si le litage est inapparent à l'oeil nu, il se manifeste toujours dans le délit même de la roche et, au microscope, dans l'orientation des minéraux phylliteux. La plupart des dépôts étudiés sont formés par une fine alternance de feuillets sédimentaires ou lamines. L'épaisseur d'une lamine varie de quelques millimètres à plusieurs centimètres. La lamine est normalement caractérisée par un granoclassement vertical (Pl. XXXVI, fig. 4). Sa base contient les grains les plus volumineux, quartz et feldspath, souvent colorés par des oxydes de fer. Son sommet en est dépourvu ; il est riche, par contre, en matière organique (Tableau VI). C'est là, en effet, que sont généralement concentrés les fossiles.

La teinte du sédiment peut varier d'une lamine à l'autre. Parfois la base des lamines ravine le sommet de la lamine sous-jacente qu'elle incorpore sous forme de galets plats. La semelle du feuillet sédimentaire présente alors des sole-marks : figures d'impact et, plus rarement cannelures d'érosion. La surface du toit des lamines correspond à un ralentissement ou à une interruption des apports. Elle comporte parfois un système de petites fentes dont le tracé irrégulier est souligné par une patine d'oxydes de fer. Les dimensions et l'aspect sont en tout point semblables à ceux des fentes de compaction se développant à la surface d'une vase qui se tasse sous l'eau (BAUDET, 1965).

x chicuro chi h	actore organidae de daerdaes u	incent engineent au eren a mearen,
Localité	Caractères du sédiment	Poids de matière organique extrac- tible par les solvants organiques (en mg pour 100 g de roche)
Adamswiller (niveau argi- leux n° 1 à paléobiocénose à crustacés ; fig. 28)	Shale vert à Ostracodes (lamine n° 3) Shale vert à Antrimpos (lamine n° 5)	1,02
Bust (niveau argi- leux à paléo- biocénose à crustacés ; fig. 29)	Niveau gris à Palaega (lamine n° 26) Shale vert sans macrofaune (lamine n° 30)	37,9 7,25
Bust (niveau argi- leux sans macrofaune)	Shale vert Shale rouge	0,91 2,12

TABLEAU VI Teneurs en matière organique de quelques niveaux argileux du Grès à meules

Au sein des lamines s'observent des figures sédimentaires particulières décrites sous le nom de Guilielmites GEINITZ. Elles consistent en disques circulaires ou elliptiques de quelques centimètres de diamètre, s'isolant aisément du sédiment encaissant (Pl. XXXVI, fig. 3). De très nombreuses stries radiaires convergent vers une zone centrale et délimitent autant de petits secteurs à surface lisse et brillante. Les interprétations les plus diverses en furent proposées (ALTEVOGT, 1968) : fruits, terriers d'organismes fouisseurs, figures d'origine inorganique ... Dans l'état actuel de nos connaissances, il semble admis que le développement des Guilielmites s'est effectué en deux temps (ALTEVOGT, 1968). Le corps de la figure aurait pris naissance par agglutination de la vase autour d'un reste organique. Ensuite, au cours de la diagenèse, le poids du sédiment aurait déformé les Guilielmites, faisant apparaître des surfaces de glissement responsables de leur aspect lustré. Certains Guilielmites du Grès à Voltzia se sont effectivement développés autour d'un crustacé ou d'un fragment végétal.

Lorsque le sédiment devient plus gréseux, le litage peut être exceptionnellement oblique. Ailleurs s'observent des groupes de lamines contournés formant des plis plus ou moins réguliers entre des lamines demeurées horizontales. C'est le convolute-bedding ou convolute lamination des auteurs de langue anglaise (Pl. XXXIII, fig. 4). La formation d'une telle structure relève de mécanismes divers : glissements sous-aquatiques (KUHN-VELTEN, 1955), déformation de ripplemarks (KUENEN, 1953), succion exercée par un courant sur un sédiment fin déjà compacté (SANDERS, 1960 ; DZULYNSKI et SMITH, 1963). Ce dernier mécanisme semble le plus fréquent.

Sur le terrain, les niveaux argileux à lamines horizontales permettent de vérifier que, dans certains cas au moins, l'extension actuelle du dépôt correspond bien à son extension originelle : les lamines se terminent en effet en biseau vers le bord de l'affleurement (Pl. XXXI, fig. 2).

B – Caractères pétrographiques

1. LA GRANULOMÉTRIE

La roche est un sédiment détritique faisant partie de la classe des lutites (GRABAU, 1904). La dimension moyenne des constituants est en effet inférieure à 50 μ . Lorsque le sédiment est essentiellement composé de minéraux argileux, on le qualifie de shale ou d'argilite suivant qu'il est pourvu ou non d'un litage apparent (MILLOT, 1949). Comme les niveaux argileux du Grès à Voltzia sont toujours lités, le terme shale s'impose. Pour la description lithologique des lamines il a cependant paru préférable de conserver celui d'argilite.

De façon constante, ces roches sont plus ou moins riches en quartz. Si le diamètre des grains de quartz demeure faible (< 20 μ , < 40 μ ou < 64 μ suivant les auteurs), l'usage français les désigne par le mot "pélite". En fait, tous les intermédiaires se rencontrent entre les argilites et les grès fins. La classification proposée par WENTWORTH (1922) tient compte à la fois de la taille des particules présentes et de leur abondance relative dans la roche (Tableau VII). Elle est d'usage facile pour l'étude des lames minces grâce aux chartes visuelles d'évaluation des pourcentages relatifs des grains dans un champ microscopique (TERRY et CHILINGAR, 1955; BACCELLE et BOSELLINI, 1965).

TABLEAU VII

Clas de Wen	sification tworth (1922)	Grès fin	Grès silteux	Siltstone gréseux	Siltstone	Siltstone argileux	Argilite silteuse	Argilite
Classification simplifiée		Grès	Grès argileux		Siltstone	Argilite gréseuse		Argilite
EMENTS	250 - 64	> 80 %	> 50 %	> 10 %		< 10 %	< 10 %	
E DES EL en microns	64 - 4		>10%	> 50 %	> 80 %	> 50 %	>10 %	
TAILLE	< 4		< 10 %	< 10 %		> 10 %	>50%	> 80%
POURCENTAGES DES ELEMENTS								

Nomenclature et classification des roches argileuses

Lorsque les descriptions sédimentologiques n'exigeront pas une étude pétrographique approfondie, les termes de grès argileux, argilite gréseuse et argilite seront suffisants. La catégorie des silstones purs n'est, en effet, jamais représentée dans le Grès à Voltzia.

2. COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

La fraction gréseuse des niveaux argileux comporte les mêmes minéraux que les grès encaissants : quartz, feldspaths potassiques, micas et, exceptionnellement, dolomite. L'étude par diffraction des rayons X d'une quarantaine d'échantillons a révélé la grande uniformité de la composition minéralogique de la phase argileuse. L'illite est le seul minéral majeur présent (90 % de la fraction granulométrique $\leq 2 \mu$). Elle est bien cristallisée. La chlorite et quelques interstratifiés constituent moins de 10 % de la fraction fine de la roche. Illite et chlorite sont des minéraux argileux ubiquistes, essentiellement hérités du continent (MILLOT, 1949).

Les niveaux argileux peuvent contenir divers minéraux accessoires : pyrite, plages de barytine ou des concrétions de goethite et d'oligiste qui se développent autour de restes organiques.

3. COMPOSITION CHIMIQUE

Les analyses ont porté sur la fraction granulométrique inférieure à 2 μ , de nature essentiellement argileuse. Deux raisons ont motivé ce choix. La variation de composition en éléments majeurs des minéraux argileux peut permettre, en effet, de mieux saisir les modalités de la sédimentation. En second lieu, certains éléments traces présents dans le milieu de dépôt se fixent dans la fraction argileuse et peuvent donner des indications sur celui-là. Les résultats de ces analyses seront discutés en détail dans le chapitre D.

II – PALÉONTOLOGIE DES NIVEAUX ARGILEUX

1. LA DIVERSITÉ DES ORGANISMES

La liste des fossiles récoltés dans les niveaux argileux du Grès à meules est particulièrement longue. Elle est donnée par le tableau VIII.

2. LES ASSOCIATIONS D'ORGANISMES

a) DÉFINITION

A l'inverse du faciès des grès à plantes, la faune et la flore des niveaux argileux du Grès à meules sont essentiellement autochtones. L'excellente conservation des fossiles récoltés en témoigne. La masse gélatineuse des méduses ou des pontes d'insectes n'aurait pu, en effet, résister à un transport prolongé. Le corps des Arthropodes est rarement désarticulé et la plupart des coquilles de lamellibranches n'ont pas leurs valves dissociées. Certains organismes aquatiques ont même été retrouvés en position de vie (Lingula). Les végétaux, parfois remarquablement intacts, ont souvent vécu à proximité immédiate de leur lieu d'enfouissement. Leurs racines ont été rencontrées in situ dans le sédiment (GALL et GRAUVOGEL, 1967 c).

Dans la plupart des cas, les organismes aquatiques des niveaux argileux forment de véritables communautés fossilisées sur le lieu même où elles ont vécu, c'est-à-dire des paléobiocénoses.

b) LES DIFFÉRENTES ASSOCIATIONS BIOLOGIQUES DES NIVEAUX ARGILEUX

L'inventaire détaillé de nombreux gisements fossilifères a permis de distinguer dans les niveaux argileux trois types d'associations d'organismes.

La paléobiocénose à crustacés

Cette paléobiocénose se rencontre de préférence dans la moitié inférieure du Grès à meules. Elle a livré les documents paléontologiques les plus spectaculaires du Grès à Voltzia : des méduses, des annélides, des crustacés (à l'exception toutefois de Clytiopsis), des limules, des pontes et des larves aquatiques d'insectes et des poissons. Des lamellibranches (Homomya et Myophoria) et des brachiopodes (Lingula) peuvent s'y rencontrer accidentellement. La faune terrestre et la flore sont bien représentées.

La paléobiocénose à lingules et à lamellibranches

Cette deuxième paléobiocénose est plus pauvre en organismes aquatiques que la précédente. Elle reste localisée près du sommet du Grès à meules. Les espèces dominantes sont les suivantes : un brachiopode (Lingula tenuissima) et deux lamellibranches (Homomya impressa et
TABLEAU VIII

Liste des organismes et des témoins de l'activité biologique rencontrés dans les nivcaux argileux du Grès à meules.

A - La faune

COELENTÉRÉS

Progonionemus vogesiacus GRAUV. et GALL

BRACHIOPODES

Lingula tenuissima BRONN

ANNÉLIDES

Eunicites triasicus GALL et GRAUV. Homaphrodite speciosa GALL et GRAUV. Spirorbis cf. pusillus (MARTIN) Triadonereis sp.

LAMELLIBRANCHES

Hoernesia sp. Entolium discites (SCHLOT.) Pectinacea indét. Myophoria vulgaris (SCHLOT.) Homomya impressa (ALB.)

MÉROSTOMES

Limulitella bronni (SCHIMPER)

ARACHNIDES

Scorpions Araignées

CRUSTACÉS

Triops cancriformis minor TRUSHEIM Isaura minuta minuta (ZIETEN) Isaura sp. A Isaura sp. B Palaeolimnadia alsatica REIBLE Palaeolimnadiopsis dictyonata REIBLE Praeleaia sp. Cytheracea indét. Triassinella aff. tsorfatia (SOHN) Euthycarcinus kessleri HANDL. Triasocaris peachi BILL Schimperella beneckei BILL Schimperella kessleri BILL Palaega pumila GALL et GRAUV. Diaphanosoma rare BILL Antrimpos atavus (BILL) Clytiopsis argentoratensis BILL Halicyne ornata TRÜMPY

DIPLOPODES

INSECTES

VERTÉBRÉS

```
Poissons
Chondrostéens indét.
Pericentrophorus aff. minimus JÖRG
Coelacanthidés
Tétrapodes
Stégocéphales indét.
Odontosaurus voltzii MEYER
Reptiles
```

B - Les témoins d'activité biologique

PONTES ET OEUFS

Monilipartus tenuis GALL et GRAUV. Clavapartus latus GALL et GRAUV. Furcapartus exilis GALL et GRAUV. Oeufs d'esthéries Palaeoxyris regularis BRONGN. Oeufs auréolés de Poissons

COPROLITHES

TRACES D'ACTIVITÉ ANIMALE

Rhizocorallium var. Glossifungites Isopodichnus Kouphichnium Empreintes pectinées Empreintes "chirothérioïdes" Taenidium Traces de fouissement

C - La flore (à l'exclusion des spores et des pollens)

ACRITARCHES

Leiosphaeridia sp. Micrhystridium sp.

CRYPTOGAMES VASCULAIRES

Schizoneura paradoxa SCHIMP. et MOUG. Equisetites mougeoti (BRONGN.) Equisetites sp. Rhizomes d'Equisétales Neuropteridium sp. Pecopteris sulziana BRONGN.

PRÉPHANÉROGAMES

Zamites vogesiacus SCHIMP, et MOUG. Baiera sp.

PHANÉROGAMES

Voltzia heterophylla BRONGN. Voltzia sp. Aethophyllum sp. Yuccites vogesiacus SCHIMP. et MOUG. Systèmes radiculaires de Phanérogames Masculostrobus rhomboidalis GRAUV. - STAMM Masculostrobus ligulatus GRAUV. - STAMM Masculostrobus cordiformis GRAUV. - STAMM Masculostrobus denticulatus GRAUV. - STAMM Voltziostrobus schimperi GRAUV. - STAMM Voltziostrobus mougeoti GRAUV. - STAMM Sertostrobus laxus GRAUV. - STAMM Graines

Myophoria vulgaris). Quelques crustacés peuvent les accompagner : des esthéries, Clytiopsis argentoratensis et Halicyne ornata. Les autres organismes sont exceptionnels. Les restes végétaux sont peu abondants.

Les organismes terrestres

Les organismes terrestres représentent le peuplement des berges, des levées ou des fles des nappes d'eau où se déposaient les sédiments argileux. Là prospérait la flore du Grès à Voltzia. Les équisétales (Schizoneura, Equisetites) y dominaient avec les gymnospermes (Voltzia, Yuccites, Aethophyllum). Les animaux terrestres étaient des Arthropodes à respiration aérienne : insectes, myriapodes, scorpions et araignées. Flore et faune terrestre ont été accidentellement entraînées dans le milieu aquatique. Elles ne constituent donc pas de paléobiocénose au sens strict du terme.

3. L'APPROCHE PALÉOÉCOLOGIQUE

L'étude des associations animales et végétales des gisements fossilifères et de leurs relations avec l'environnement physico-chimique est fondamentale pour reconstituer les milieux anciens. C'est l'objet de la paléoécologie.

Une abondante littérature a été consacrée à cette discipline depuis une quinzaine d'années (HECKER, 1957 ; LADD, 1957 ; MOORE, 1957 ; GEORGE, 1958, 1959 ; CLOUD, 1959 ; JOHNSON, 1960 ; AGER, 1963 ; IMBRIE et NEWELL, 1964 ; CRAIG, 1966 ; LEHMAN, 1966 b). Elle distingue parfois la paléoautoécologie qui étudie le mode de vie des organismes considérés isolément, et la paléosynécologie dont l'objet est l'étude des associations animales et végétales fossiles.

La paléoautoécologie, c'est-à-dire la reconstitution du mode de vie des diverses espèces, a été esquissée dans la partie paléontologique de ce mémoire. Elle se déduit de l'étude morphologique et de la comparaison avec des formes vivantes voisines (principe d'uniformitarisme). Ce mode de raisonnement doit être utilisé avec beaucoup de prudence. Pour les groupes éteints, il peut conduire à des extrapolations risquées. On sait, en effet, pour certains organismes, que leurs conditions de vie ont pu se modifier d'une période géologique à l'autre sans changements morphologiques sensibles.

La paléosynécologie réalise la synthèse des données fournies par l'étude des différentes espèces d'un gisement et des traces de leur activité. Par recoupements successifs, elle permet de réduire la marge d'incertitude dans l'interprétation des milieux anciens. Si les exigences Acologiques de certains genres du Grès à Voltzia demeurent inconnus (Euthycarcinus par exemple), quelques formes cependant ont été décrites dans des faciès bien caractérisés d'autres formations géologiques. La recherche bibliographique de tels renseignements a donc été particulièrement utile.

L'étude paléoécologique des niveaux argileux du Grès à meules, complétée par les données de la sédimentologie et de la géochimie, a permis d'interpréter les milieux de dépôt correspondant aux trois types d'associations biologiques précédemment définies :

- les paléobiocénoses à crustacés,
- les paléobiocénoses à língules et à lamellibranches,
- les organismes terrestres.

III – PALÉOBIOCÉNOSES À CRUSTACÉS ET MILIEU DE DÉPÔT

1. LE NIVEAU ARGILEUX Nº 1 D'ADAMSWILLER

Ce niveau s'est révélé être le plus riche en enseignements. Il a été étudié du triple point de vue de la paléoécologie, de la sédimentologie et de la géochimie. Il sera pris ici comme type de niveau argileux du Grès à meules.

a) LOCALISATION ET TECHNIQUE D'EXPLOITATION

Cette lentille argileuse a été exploitée de 1961 à 1968 à Adamswiller, en collaboration avec L. GRAUVOGEL (GALL et GRAUVOGEL, 1968 b). Elle occupait un chenal situé vers le milieu du Grès à meules, dans une carrière provisoirement abandonnée (carrière n° 7 de l'Annexe I). Le niveau était recoupé par le front de taille sur une vingtaine de mètres de largeur. Son épaisseur moyenne au centre était de 0,60 m. Le sédiment fut débité lamine par lamine sur une surface d'environ 25 m². Le traitement des restes organiques qu'il contenait a été décrit dans un chapitre précédent (p. 17).

b) ÉTABLISSEMENT DU PROFIL PALÉOÉCOLOGIQUE

Pour chaque lamine du niveau argileux, les observations d'ordre paléontologique et sédimentologique ont été consignées sur un profil paléoécologique. Celui-ci permet de regrouper d'une manière schématique un grand nombre de renseignements (Fig. 28).

La partie gauche du profil est réservée aux caractères sédimentologiques : granulométrie du sédiment, nature du litage, figures sédimentaires, accidents lithologiques, minéraux accessoires, couleur du sédiment d'après la Charte internationale des couleurs des roches, indications sur les paléocourants fournies par les figures sédimentaires et l'orientation des végétaux.

La partie droite du profil concerne les caractères paléontologiques des lamines : la faune, la flore, et les témoins de l'activité biologique, ainsi que leurs teneurs en bore. Les organismes firent l'objet d'un relevé qualitatif et quantitatif. Leur fréquence est exprimée, au niveau de chaque lamine, par un trait vertical dont l'épaisseur est fonction du nombre d'exemplaires rencontrés. Ainsi, les espèces ou les groupes très abondants, représentés par plus de 10 exemplaires par mètre carré de surface, sont figurés par des cases entièrement noires. Aux organismes fréquents (1 à 10 exemplaires par mètre carré) correspond un trait épais, tandis que les formes rares (moins d'un exemplaire par mètre carré) sont représentées par un trait étroit. Afin de pouvoir suivre plus aisément l'évolution du peuplement, les organismes ont été classés dans l'ordre de leur disparition du milieu.

Ce mode de représentation permet de saisir du premier coup d'oeil l'abondance des différents organismes au sein de chaque lamine, les associations paléobiologiques successives et le relais des faunes et des flores au cours du temps.

c) LA SUCCESSION DES ORGANISMES

L'analyse paléontologique du niveau argileux montre que chacune des dix-neuf lamines peut être caractérisée par ses associations faunistique et floristique, c'est-à-dire par son spectre paléoécologique. La base du profil (lamines 1 à 5) est statistiquement la plus riche en organismes aquatiques : Limulitella, Euthycarcinus, Antrimpos, ostracodes... Les mérostomes et les crustacés régressent ensuite tandis que prolifèrent les larves d'insectes (lamines 7 à 11). Vers le sommet du profil intervient un appauvrissement général de la faune aquatique.

A l'inverse des animaux, la flore, en particulier les équisétales, prend de plus en plus d'importance, traduisant l'implantation progressive d'une végétation palustre. Le grès surincombant ravine l'ensemble du dépôt dont l'évolution finale reste inconnue. Celle-ci serait vraisemblablement marquée par l'assèchement du milieu comme le montrent d'autres niveaux argileux du Grès à meules (présence de fentes de dessication, de racines in situ ou d'empreintes de pas de Vertébrés).

En résumé, les organismes aquatiques disparaissent au fur et à mesure que la nappe d'eau se restreint et se confine. Tout se passe comme si une sélection de la faune s'opérait en fonction de sa tolérance aux modifications physico-chimiques du milieu. Les formes les plus résistantes à cet égard s'avèrent être les poissons, les larves d'insectes et, parmi les crustacés, les esthéries et Euthycarcinus.



C	Caractèro	0 0	édimentologiques												Co	arac	tòro	6	pole	ont	oloç	jiqu	0.5										
r tea courante courante	Minéraux occessoires	ŝ	Biructures of Figures addimentatives	Lithold	igie I							Found							Táre d'ao nriga	nina nina							P.	07.8					
					1		1	Neture	-	Scheme in the second	wijim	Subsection.	10	and and	1		Cieda Cieda	1	No.	uu.	1	1			and a second	-	linear li	i	-	ł	1	ł	ļ
HUE TOY 478		87		U			57				-						Π	F					_						-				ï
10,41 107 11/1		5.0													Ľ			I	Τ				Ι	Ι	Ι	Τ				Ι	Ч	Π	Ī
HUE 10Y 478		6.5		1		14	4																								_		
HUE 10Y 4/8		0.4	And the second second	NPA.		11	6		_	_	_	_			_	_	_	L			_	_	_		1			_	_	_	Ц	_	
18JE 10Y 4/8		5.5		N			64 <u> </u>																										
HUE 10 Y 4/8		8.0	1000000	XT		17	4							Т	П		Т			8			Т	Т						Т		П	
URIE VIV AVE			n 12 0 h	R) T		(\land)	1				1				tt		1	1					-	-	-		-			-	+	1	
11010 1011 110		-		SN.		67	7		-	-	+			T	tt	+	-	t						Т					Π	T	-	T	
HUE 10Y 478		80	12012103			V P	1-		-		-	-		-	4	+	+	\vdash			-			-			-		-	-	+	4	
HUE ROY A/B		++	80.900	NT.		11	-		+	+	-	-			+	+	-	⊢			-				-		_				+	rt.	
			7221-1-1-1-2-2	20.		(/)	-		+		-	-			+	+	-	1			_		_				_	_	1		-	١.	
HUE 104 878		**	dian/Alexande			///	6											L				_		_				_	_			_	
HUE DV D/E		47				114	4																										
HUE 10Y 478		4.6		3		U.S.	1																										
- HE 10 13		11				in a	-		-	-	-	-		-	+	+	-	-	-		-	-		-			-	-		-	-	+	
HUE HOY 4/8		40		R		1000			-		-	-		+	-	+	-	1				_	_		_						_	_	
HUE TOY 4/8 HUE TOY 5/8		3.0		5		1.1																											
1108 107 478		87	and the state of the state of the	10 m		111	0		-		-			1		Т	-	-													T		
HUE 10Y 1/8		2.0	<u></u>	200-		111	-		+		-	-		-	-	-	-	-	-		-				-			-	-		-	+	
HAR SOY A/R		8.4		5		1111	-		-		-			-	-		-	Ļ	-	_	_	_		_	_			_	_	_	_	-	
1108 107 878 1108 107 878		82		S					_	_					_						_								_		_	_	
110E X0Y 878		80																			_												
HAR HOV A/R		1.0					7				-				П	IT	П	-													T		
HUE 10 Y 8/R		2.0				11/	1-		+	-	+			+	TĽ,	÷	÷	t	-		-				-			-			-	+	
						1/ 1/	1-		-	-	-	-		-	4	+	-	-	-	-	-	_		-			_		-			+	
TIME BY A/R		87	and the state of the	A		////	ð		_	_		_		-	-	-	-	L	Ц.												_	_	
				1			X																										
HOE TOY 878		10				111					Г	П																					
HUE DV 4/8		14.				1111				ГΤ	1	1		-	τh	Ľ	-	1									-				-	+	1
HUE BY B/ 8		1.5				1////	1		T.	-	-			T.	H	H-r	tr	1						-			-				-	+	
18,45,107,878		2.2		N		11/1	-	\square	4		-			1	щ	Щ.	μ.	1	-		_	_			-		_	_	_		_	+	
HUE TOY 4/8		81				()				Ш		Ш		-				L	_		_							-			_	_	
HUE LOY 478		80					-		P		Ľ.			+		4	1	-			4			-		-	_	4		-			
Hole 10Y 478		10.		2						m	Т			T	Т		Т	1															
HUE 10Y 4/8		100		1		11/ //	1	-		42	÷		-	++	4	-	t.	+-			-	-		-	-			-	-	-	-	+	
				1		11/1/1	-	-	-	-	-		-	-	- 6	1	-	_	-		_	_		_	-	_	_	_	-	_	-	-	
HUE 10Y 47E		10				1111			_	_	_			_		١.,	_	L													_	_	
10.00 LOV 8-20		1.0		No.																													
HUE 101 878																	1	Ι					l				1]
HUE BY BZR		1.8																															
							-		-				_								_						_		_	_	-		

d) LA SUCCESSION DES LAMINES

Les lamines sont normalement granoclassées. Chacune d'entre elles correspond ainsi à un seul apport sédimentaire, séparé du suivant par un intervalle de temps variable. Chaque lamine nouvelle est due à une arrivée d'eau qui apporte du matériel détritique, de l'oxygène, des éléments nutritifs et probablement des organismes. Après décantation des particules argileuses, l'aération de la nappe se réduit à nouveau. Les eaux stagnent. Le milieu se confine comme le prouve la présence de pyrite au sommet de la lamine n° 11. Localement s'établissait là un régime euxinique avec libération de H_2S . Ceci entraîne une mortalité massive de la faune benthique. Côte à côte peuvent alors se rencontrer différents stades de développement des mêmes espèces ; tel est l'exemple de la lamine n° 3 où voisinent larves et adultes d'Euthycarcinus.

A la fin du dépôt, la matière organique peut s'accumuler. Le sommet de certaines lamines se colore alors soit en gris, soit en brun (Tableau VI). Parfois l'assèchement de la nappe d'eau a rassemblé les êtres aquatiques dans des flaques résiduelles. Quand celles-ci s'assèchent à leur tour, les organismes s'agglutinent par plages. Tel est le cas de la lamine n° 5 où des plages formées par une centaine d'exemplaires d'Antrimpos ont été fossilisées. H. et G. TERMIER (1954) ont publié une image saisissante d'une telle évolution, montrant un troupeau d'hippopotames qui périt dans les mares résiduelles d'un lac en voie d'assèchement.

e) L'OXYGÉNATION DU SÉDIMENT

La conservation intégrale des lamines est imputable à l'absence d'organismes fouisseurs (VAN STRAATEN, 1959). Seuls quelques terriers ont été rencontrés. Ils restent localisés à proximité des interfaces qui séparent les lamines argileuses d'un apport plus grossier (lamines n° 12 - 13 et 14 - 15). Celui-ci traduit en effet une agitation plus importante de la masse d'eau, donc de l'oxygénation du fond. Ailleurs l'endofaune est absente car le sédiment est dépourvu d'oxygène libre. Le milieu interne de la vase devait être fortement réducteur. Il a favorisé la conservation de la chitine des Arthropodes (BUBENICEK, 1964). Il permet également de comprendre l'étonnante stabilité chimique des hydrocarbures de certaines équisétales du Grès à Voltzia. En effet, des Equisetites provenant des lamines n° 16, 17 et 19 de ce profil ont été analysés par KNOCHE et OURISSON (1967). Les chromatogrammes obtenus se superposent parfaitement à ceux des constituants des cires cuticulaires des prêles actuelles. Les hydrocarbures saturés n'ont donc subi aucune modification chimique depuis l'enfouissement des végétaux il y a 200 millions d'années.

f) LE CADRE SÉDIMENTOLOGIQUE

La direction des paléocourants au sein du profil présente une certaine constance. Elle concorde avec celle de l'axe du chenal (NNW-SSE) reconstitué par projection stéréographique. Le sens même du courant est difficile à préciser. Cependant, le profil des ripple-marks montre qu'à certains moments au moins, il était dirigé vers le Sud. La nature argileuse du sédiment et la dispositon irrégulière de la plupart des organismes impliquent des courants peu actifs (bas régime hydrodynamique). Quelquefois ils furent cependant assez forts pour déplacer un matériel plus gréseux (lamines 13 et 15). Le cadre sédimentologique ainsi évoqué est celui d'un bras mort en voie d'envasement.

Les apports sédimentaires intermittents qui ont provoqué la succession des lamines ont vraisemblablement été contrôlés par des facteurs climatiques : pluies, crues du réseau fluviatile, marées ...

g) LES RENSEIGNEMENTS FOURNIS PAR L'ÉTUDE GÉOCHIMIQUE

L'évolution du niveau argileux a été enregistrée dans les variations verticales de son spectre géochimique (Fig. 37). Ceci est particulièrement net pour le bore qui est un bon indicateur de la paléosalinité (p. 172). Dans ce profil, la teneur en bore croît rapidement de la base vers la lamine n° 11 qui présente justement des signes de confinement accentué : présence de pyrite, disposition des larves d'insectes par plages. Au-dessus, les concentrations en bore restent élevées, ce qui confirme les indications de la paléobiologie sur le milieu.

Les teneurs du niveau argileux en magnesium, strontium, vanadium, zinc, cuivre et plomb croissent dans le même sens que le bore. Ces variations traduisent la tendance générale du milieu de sédimentation au confinement par concentration progressive des sels minéraux. De plus, les teneurs en certains oligoéléments sont liées à l'abondance des êtres vivants. Ainsi le plomb et le cuivre augmentent considérablement à partir de la lamine n° 14, au moment où les débris

9

végétaux prédominent sur la faune. De même le chrome est plus abondant au niveau de la lamine n° 5, là où les organismes aquatiques furent l'objet d'une mortalité massive. Or, on sait que les crustacés actuels retiennent cet élément (FUKAI et BROQUET, 1965). Le nickel serait probablement à interpréter dans une voie semblable.

h) APPRÉCIATION DU TAUX DE SÉDIMENTATION

D'une manière générale, la fossilisation des êtres vivants implique un enfouissement rapide qui les met à l'abri, au moins partiellement, de la destruction mécanique, des fermentations bactériennes et des organismes se nourrissant de cadavres. Une sédimentation lente ne peut offrir une telle garantie. L'étude détaillée des cycles biologiques dans le profil n° 1 d'Adamswiller apporte des indications sur la vitesse à laquelle s'est effectué le dépôt.

Il en est ainsi du cycle des gymnospermes. Les pollens de gymnospermes (Triadispora) sont en effet très abondants dans les niveaux gris des lamines de la partie inférieure du profil (lamines 4 à 11). Ils évoquent, par leur densité, les "pluies de soufre" qui caractérisent la floraison des conifères actuelles. Les sporophylles des cônes mâles dont ils proviennent (Sertostrobus) apparaissent un peu plus haut dens le profil (lamines 7 et 8). Elles sont finalement relayées par les graines (lamines 12 et 14). Si cette succession n'est pas le fait d'une coîncidence, il y a là une indication précieuse : le niveau argileux se serait déposé au cours d'un seul cycle de la végétation, du printemps à l'automne.

Le cycle biologique des insectes confirmerait cette conclusion. En effet, la ponte des insectes est normalement une activité saisonnière. Or les pontes sont essentiellement localisées dans la partie inférieure du profil (lamines 1 à 8), celle qui correspond à la floraison des gymnospermes.

La succession assez régulière des organismes animaux et végétaux permet d'interpréter l'histoire du milieu comme le résultat d'une sédimentation qui succède à une période humide et évolue ensuite par assèchement croissant. Les cycles biologiques des insectes et des gymnospermes laisseraient à penser que cette évolution s'est déroulée au cours d'une même année : pontes et pollens au printemps, adultes et graines à l'automne. Telle est du moins l'hypothèse qui paraît la plus plausible.

i) CONCLUSION

Le niveau argileux n° 1 d'Adamswiller montre l'épanouissement de la paléobiocénose à crustacés. Mais de lamine en lamine, on voit la faune aquatique s'appauvrir, tandis que la végétation gagne en importance. Les fluctuations de la sédimentation trouvent leur écho dans la paléobiologie et dans la géochimie des éléments traces du dépôt. Il est ainsi possible de les enregistrer sur des variations d'épaisseur de quelques millimètres.

Le paysage qui correspond au dépôt de ce niveau argileux est celui d'une étendue d'eau temporaire où salinité et confinement vont en croissant. Cette histoire s'est sans doute déroulée du printemps à l'automne d'une même année.

2. LE NIVEAU ARGILEUX DE BUST

a) DESCRIPTION

Ce deuxième niveau argileux affleurait dans l'exploitation la plus occidentale de Bust (carrière n° 17 de l'Annexe I). Il était situé dans le tiers inférieur du Grès à meules. Il fut exploité, en collaboration avec L. GRAUVOGEL, sur une surface d'environ 40 m². Dans l'axe de la lentille, son épaisseur était de 0,45 m.

L'ensemble du profil peut être décomposé en trois parties (Fig. 29) : un terme inférieur gréseux ne renfermant que quelques végétaux ; un terme moyen, plus fin, à riche faune aquatique; un terme supérieur à organismes essentiellement terrestres.

La base du profil est constituée par un niveau bréchique provenant du remaniement d'un grès carbonaté. Les lamines suivantes sont gréseuses et bien granoclassées (Pl. XXXVI, fig. 4). L'intercalation de grès argileux et l'orientation de plantes entières arrachées des rives dénotent un courant actif. Celui-ci a sans doute freiné l'installation de la faune aquatique. Dans la partie moyenne du profil, le milieu devient plus calme : des ripple-marks se développent et la fraction argileuse devient largement prédominante dans les lamines. La faune colonise la collection d'eau. Les insectes et les poissons y précèdent les crustacés. Deux périodes de confinement surviennent (lamines 24 et 26) provoquant la mortalité massive de la population aquatique. Certains organismes ne survivront pas à ces catastrophes : Progonionemus, Schimperella, Palaega, Antrimpos ... Le repeuplement du milieu s'effectue ensuite partiellement et avec un certain retard (Halicyne et Euthycarcinus par exemple). Dans la partie supérieure du profil, la faune açuatique disparaft, à l'exception des esthéries, des larves d'insectes et des poissons. Par contre la flore gagne en importance.

Quatre analyses géochimiques furent effectuées sur ce niveau argileux. Les teneurs en bore les plus élevées se situent au sommet du dépôt.

Ce profil paléoécologique démontre, là encore, un relais des organismes au cours du temps, relais qui paraît contrôlé par leur aptitude à survivre dans un milieu se confinant progressivement. Bien que la partie sommitale du dépôt ne soit pas observable, l'évolution générale du profil annonce l'assèchement de la nappe d'eau et l'installation d'une végétation palustre.

b) APPRÉCIATION DU TAUX DE SÉDIMENTATION

L'examen du profil paléoécologique apporte quelques indications sur le taux de sédimentation.

Un raisonnement analogue à celui utilisé pour le niveau argileux n° 1 d'Adamswiller (p. 126) conduit à reconnaître dans ce profil quatre époques de floraison marquées par l'abondance des sporophylles mâles et des pollens de gymnospermes (lamines 20, 25-26, 50 et 55). Si la floraison correspond effectivement à un cycle saisonnier, l'ensemble du dépôt a pu s'effectuer en quelques années.

Dans le même niveau, une abondante population de Palaega pumila a pu être étudiée biométriquement. Elle provient des lamines n° 26 et 28. La figure 30 exprime graphiquement la relation qui existe entre la fréquence des individus, leur taille et leur localisation dans le profil. Elle met en évidence une augmentation statistique de la longueur du corps des crustacés au cours du temps : les exemplaires les plus petits sont surtout localisés dans la lamine n° 26, les exemplaires les plus grands dans la lamine n° 28. Or la taille des Arthropodes est fonction du nombre de mues. Si l'on admet que l'ensemble des Palaega du niveau argileux dérive d'un même contingent initial qui a colonisé le milieu à un moment donné, l'intervalle de temps qui sépare la population de la lamine n° 26 de la population de la lamine n° 28 correspond à la durée de quelques stades d'intermue. Or, chez les Isopodes actuels, les mues sont espacées de une à quelques



Figure 30 - Distribution graphique des longueurs du corps d'une soixantaine d'exemplaires de Palaega pumila GALL et GRAUV, provenant d'un même gisement (niveau argileux de Bust) et mettant en évidence une augmentation statistique de la taille des populations de la lamine n° 26 à la lamine n° 28.

semaines suivant l'âge des individus et leur appartenance systématique (ZIMMER, 1926 ; LEGRAND, 1952). La durée qui correspond au dépôt des deux lamines serait du même ordre de grandeur, c'est-à-dire une fraction d'année.

3. CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES NIVEAUX ARGILEUX À CRUSTACÉS

Plusieurs autres niveaux argileux à paléobiocénoses à crustacés furent exploités par L. GRAUVOGEL au long des années, à Vilsberg et à Arzviller. Les principaux caractères mis en évidence dans les gisements d'Adamswiller et de Bust s'y retrouvent.

Il s'agit généralement de dépôts de contour lenticulaire formant le remplissage d'anciens chenaux. Ils sont surtout localisés dans la moitié inférieure du Grès à meules. Le sédiment est toujours constitué par une succession de lamines millimétriques résultant d'apports détritiques fins et intermittents. Lorsque l'évaporation l'emportait sur les arrivées d'eau, le milieu s'appauvrissait en oxygène et la salinité augmentait, provoquant des mortalités massives parmi la faune aquatique. Le sommet des lamines est alors coloré en gris ou en brun par la matière organique. Au cours du temps, les organismes aquatiques étaient relayés par la végétation car la nappe d'eau s'asséchait progressivement. Un magnifique réseau de fentes de dessication au sommet d'un niveau argileux de Vilsberg confirme ce type d'évolution. Celui-ci fut pressenti par BILL (1914), par MEISCHNER (1962) et par JÖRG (1969) qui constatèrent que la faune était essentiellement localisée dans la partie inférieure des lentilles argileuses. Ces conditions expliquent, au moins partiellement, le nanisme ou le caractère juvénile présenté par certaines populations.

De tels niveaux argileux, épais de quelques décimètres, se sont déposés rapidement. Les indications fournies par les organismes permettent d'estimer cette durée à moins d'une année pour les uns, à quatre ou cinq ans pour les autres. Ces taux de sédimentation sont couramment observés dans les environnements littoraux ou deltaïques actuels comme la mer du Nord ou le delta du Mississippi (KUENEN, 1950 ; REINECK, 1960 ; SHEPARD, 1960 ; VAN STRAATEN, 1960). Dans ces paysages on sait que les dépôts ont en outre une existence brève, de l'ordre de quelques mois ou de quelques années.

4. INDICATIONS SUR LE MILIEU DE DÉPÔT FOURNIES PAR LES ORGANISMES

a) LA SALINITÉ

Les organismes aquatiques de la paléobiocénose à crustacés ont des affinités marines certaines. En effet, Eunicites, Palaega et Antrimpos ont été décrits dans les dépôts saumâtres ou sursalés du Jurassique de Solnhofen (KUHN, 1961 ; BARTHEL, 1964 ; JANICKE, 1969). Les ostracodes appartiennent à des genres de milieu saumâtre ou marin (KOZUR, 1968). Spirorbis se rencontre à la fois dans les eaux douces du Carbonifère et les niveaux marins du Muschelkalk (ROGER, 1952). D'autre part, les niveaux argileux à crustacés renferment parfois des éléments de la paléobiocénose à lingules et à lamellibranches : Lingula, Homomya, Myophoria et Halicyne. Or ces formes sont d'origine marine. Seul Triops a été considéré comme une forme dulcicole (TRUSHEIM, 1937).

Ainsi, au cours des époques géologiques, beaucoup de ces organismes se sont montrés relativement tolérants aux variations de la salinité : ce sont des êtres euryhalins. D'autre part, lors de l'assèchement du milieu aquatique, l'augmentation de la salinité opérait une élimination progressive des organismes. D'après les profils paléoécologiques d'Adamswiller et de Bust, les méduses et certains crustacés tels Antrimpos, Schimperella et Palaega disparaissent les premiers du milieu. Ces formes sont les plus sensibles aux variations physico-chimiques. Un second groupe comprenant Limulitella et, parmi les crustacés, Euthycarcinus et Halicyne, semblerait supporter des concentrations plus élevées. Les organismes les plus résistants sont ceux qui persistent jusqu'au sommet des profils : les poissons, les larves d'insectes et, dans une mesure moindre, les esthéries. Ainsi se trouve matérialisée une véritable "échelle de tolérance" de la faune aquatique à des degrés de confinement croissant du milieu.

b) LA BATHYMÉTRIE

Les pontes d'insectes constituent, par leur signification écologique, un élément caractéristique de ces niveaux. L'activité reproductrice des insectes aquatiques est en effet liée à la proximité d'un rivage et à une faible tranche d'eau (SÉGUY, 1950 ; BERTRAND, 1954 ; THIENEMANN, 1954 ; CHOPARD, 1963). Les eaux peuvent être douces ou saumâtres. L'existence d'une abondante végétation implique des conditions bathymétriques analogues. On imagine volontiers une épaisseur d'eau de l'ordre du mètre.

5. LE MILIEU DE DÉPÔT

Les indications fournies par la paléontologie, la sédimentologie et la géochimie des niveaux argileux à crustacés sont convergentes. A la lumière des travaux récents sur les aires littorales et deltaïques (GILLET et ACHARD, 1947 ; SCHACHTER, 1950 ; PETIT, 1953 ; DEBYSER, 1955 ; TRICART, 1955 ; DUBOUL-RAZAVET, 1956 ; RIVIÈRE et VERNHET, 1958 ; PETIT et MIZOULE, 1962 ; SACCHI, 1961 ; CHAMPEAU, 1966 ; GADEL, 1968), il est possible de résumer les caractères essentiels de l'environnement ou paléobiotope :

- 1. une nappe d'eau peu profonde et d'étendue restreinte
- 2. un peuplement d'organismes euryhalins où dominaient les crustacés
- 3. un approvisionnement intermittent assurant la sédimentation de particules fines
- 4. un taux de sédimentation élevé (quelques décimètres par an)
- 5. des eaux qui s'appauvrissaient périodiquement en oxygène, provoquant une mortalité massive de la faune aquatique
- 6. une salinité fluctuante qui croissait statistiquement au cours du temps
- 7. une évolution générale se traduisant par l'assèchement progressif de la nappe d'eau et l'installation d'une végétation palustre.

Ces caractères mettent en évidence la grande variabilité des facteurs physico-chimiques et biotiques de l'environnement. A l'heure actuelle, de telles conditions sont réalisées dans les étendues d'eaux saumâtres situées à la frontière des domaines marin et continental, communément qualifiées de lagunes.

IV – PALÉOBIOCÉNOSES À LINGULES ET À LAMELLIBRANCHES ET MILIEU DE DÉPÔT

1. LE NIVEAU ARGILEUX À LINGULES ET À LAMELLIBRANCHES DE HANGVILLER

Ce niveau argileux était situé dans la partie la plus méridionale de l'une des carrières L. MERTZ de Hangviller (carrière n° 21 de l'Annexe I), à environ 1,50 m sous le sommet du Grès à meules. Son extension horizontale était importante. Il affleurait sur toute l'étendue du front de taille. Les difficultés d'accès de l'affleurement ne permirent d'exploiter ce niveau que sur quelques mètres carrés de superficie. Il ne fut guère possible d'effectuer un relevé quantitatif des organismes aussi détaillé que pour les niveaux argileux à crustacés. L'épaisseur du niveau argileux était en moyenne de 0,50 m. D'après la nature pétrographique du sédiment et d'après son contenu paléontologique, une quinzaine de subdivisions y furent reconnues. Elles correspondaient en gros à autant de lamines de grande épaisseur. Les lamines d'ordre millimétrique sont en effet rares. Leur partie sommitale ne présentait d'ailleurs jamais la coloration grise qui résulte d'une accumulation de matière organique, telle qu'elle fut observée dans les lamines des niveaux argileux à crustacés.

Les organismes aquatiques étaient localisés dans le tiers supérieur du niveau argileux (Fig. 31). Trois lamines (9, 11 et 14) y ont livré une faune pauvre en espèces mais riche en individus. Les lingules (Lingula tenuissima) et les lamellibranches (Homomya) sont les espèces dominantes. Sur une superficie de 10 dm², 30 lingules ont été dénombrées. Certaines étaient en position de vie, la coquille redressée perpendiculairement au litage de la roche. La densité des Homomya est comparable. Les deux valves des coquilles sont généralement encore en connexion, leur concavité tournée vers le haut. Myophoria vulgaris est plus rare. Les esthéries mises à part, les crustacés sont moins fréquents. Il s'agit de Clytiopsis argentoratensis et de Halicyne ornata. Un unique exemplaire d'Antrimpos, de très grande taille, et une exuvie de Limulitella ont également été recueillis (lamine 11). Les organismes aquatiques ne sont pas uniquement accumulés au sommet des lamines. Ils se rencontrent souvent dans toute leur épaisseur. Des terriers d'organismes fouisseurs, à parcours horizontal, leur sont associés.

			CARACTÈRES SÉDIMENTOLOGIQUES	CARACTÈRES PALÉONTOLOGIQUES
			Grès gris à plantes cannelures d'érosion de direction N 10	00
÷		16	Argilite gréseuse verte	_ Nombreux fragments de plantes (Voltzia , Equisétales).
_		15	Argilite verte	
=		14	Argilite verte	_ Nombreuses Homomya. 1 Halicyne.
-	·	13	Argilite gréseuse verte	_ Traces de bioturbation.
-		12	Argilite verte	Très nombreuses esthéries et Homomya
-		"	Argilite verte	Nombreuses Lingula. Clytiopsis et Halicyne fréquents. 1 Limulites, 1 Antrimpos.
		10	Grès argileux gris	Terriers d'organismes fouisseurs.
-				
				(Très nombreuses Lingula et Homomya.
-		9	Argilite verte	Rares Myophoria et Clytiopsis.
-			végétaux orientés N 30	Fragments de plantes (Voltzia).
-				
-		8	Argilite verte	_ Débris végétaux, graines et écailles.
-	··········	7	Argilite gréseuse verte	_ Debris vegetaux
_		6	Argilite verte	_ Debris vegetaux
-		5	Argilite gréseuse verte	
-		4	Argilite verte	_Débris végétaux
		3	Argilite gréseuse verte	
		2	Argilite verte	
10 cm		,	Argilite gréseuse verte à litage oblique	
]:			Grès gris à plantes	

Figure 31 - Relevé paléoécologique d'un niveau argileux à lingules et à lamellibranches. Hangviller. (Carrière L. MERTZ - front SW - avril 1967)

La flore est peu abondante. Les restes végétaux, essentiellement des rameaux de Voltzia, n'ont jamais la grande taille et la belle conservation de ceux des niveaux argileux à organismes terrestres ou à crustacés. Les plantes sont souvent dissociées. Une telle disposition indique que les vététaux ont subi un transport prolongé avant d'arriver dans le milieu du dépôt. L'inventaire palynologique détaillé de ce niveau a été effectué par ADLOFF et DOUBINGER (1969). Les pollens y sont beaucoup plus nombreux que les spores. Des Acritarches appartenant au genre Leiosphaeridia y furent rencontrés. Les grains de pollen ne sont jamais concentrés par plages au sommet des lamines.

L'étude de ce niveau argileux ne laisse pas apparaître un relais des organismes comparable à celui qui fut observé dans les niveaux argileux à crustacés. Cependant, la localisation des restes végétaux dans la partie supérieure du profil dénote peut-être une influence croissante des apports continentaux.

2. CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES NIVEAUX ARGILEUX À LINGULES ET À LAMELLIBRANCHES

La paléobiocénose à lingules et à lamellibranches a été rencontrée à plusieurs reprises (carrières n° 5, 15, 16, 18, 21, 27 de l'Annexe I), toujours vers le sommet du Grès à meules. Elle constitue peut-être un repère chronostratigraphique. A l'affleurement, les niveaux argileux à lingules et à lamellibranches ont une extension horizontale supérieure à celle des niveaux argileux à crustacés. Ils sont formés par une succession d'épaisses lamines. Les lamines d'ordre millimétrique sont exceptionnelles. Les organismes sont localisés indifféremment à la base ou au sommet du profil. La faune aquatique est pauvre en espèces. Elle comprend un brachiopode, Lingula tenuissima, deux lamellibranches, Homomya impressa et Myophoria vulgaris, trois crustacés, Isaura minuta minuta, Clytiopsis argentoratensis et Halicyne ornata, et des terriers (Rhizocorallium). Les autres espèces sont accidentelles (Hoernesia, Entolium). Les brachiopodes et les lamellibranches sont toujours représentés par un grand nombre d'exemplaires. Les formes terrestres sont peu importantes : quelques ailes d'insectes et des fragments végétaux de taille modeste. Des racines in situ ne furent jamais rencontrées.

3. INDICATIONS SUR LE MILIEU DE DÉPÔT FOURNIES PAR LES ORGANISMES

Le genre Lingula semble avoir eu, depuis l'ère primaire, une grande stabilité écologique (CRAIG, 1952 ; PAINE, 1970) : le peuplement des substrats meubles de la zone intertidale. Ce brachiopode qui vit enfoncé dans le sédiment se montre très tolérant aux variations de salinité et d'oxygénation du milieu.

Homomya impressa est également un organisme fouisseur. Il est connu du Muschelkalk inférieur et de la formation du Röt, faciès saumâtre du Buntsandstein supérieur de la rive droite du Rhin. Myophoria vulgaris se rencontre dans les mêmes niveaux stratigraphiques. La taille de ces deux lamellibranches est nettement inférieure à celle des mêmes espèces du Trias moyen. L'épaisseur de leur coquille est extrêmement mince. Ce sont là des indices de salinité anormale (REMANE, 1958 ; HALLAM, 1965).

L'holotype de Halicyne ornata provient d'une dolomie du Muschelkalk moyen. Plusieurs autres espèces de Halicyne ont été décrites dans des faciès marins, saumâtres ou sursalés d'Europe et d'Amérique. Seul Clytiopsis argentoratensis reste localisé, dans l'état actuel de nos connaissances, dans le Buntsandstein supérieur.

Les Acritarches, microorganismes aux affinités incertaines, ont été récoltés dans les sédiments de toutes les époques géologiques. Ce sont généralement des formes marines. En particulier le groupe des Leiosphaeridia semble lié aux eaux littorales (STAPLIN, 1961).

En résumé, les organismes aquatiques de la paléobiocénose à lingules et à lamellibranches sont normalement associés à des faciès marins. Ils se montrent cependant tolérants vis à vis d'éventuelles variations de la salinité. L'absence complète de formes strictement marines dans le Grès à meules est à cet égard significative. L'environnement ne devait pas présenter la stabilité physico-chimique des milieux marins francs. L'état fragmentaire de la flore laisse supposer que la végétation n'a pas poussé à proximité du milieu de dépôt.

4. LE MILIEU DE DÉPÔT

L'extension horizontale des niveaux argileux à lingules et à lamellibranches implique l'existence d'une nappe d'eau étendue. Les fluctuations des apports détritiques s'y trouvaient amorties provoquant le dépôt de lamines épaisses. Le milieu aquatique était plus permanent, mieux oxygéné et peut-être plus profond que celui des niveaux argileux à crustacés. Il a favorisé l'installation d'organismes fouisseurs (Lingula, Homomya, terriers divers). Cependant les teneurs en bore du sédiment, c'est-à-dire les paléosalinités, sont comparables dans les deux cas. Bien que sporadiquement présent dans les niveaux argileux à crustacés, Lingula est la forme guide de la paléobiocénose à lingules et à lamellibranches. Ce brachiopode est normalement inféodé aux substrats meubles des eaux littorales où les variations de salinité et d'oxygénation sont accusées (THOMPSON, 1968; PAINE, 1970). Seules quelques espèces d'origine marine purent s'adapter à un tel environnement. Les végétaux étaient introduits à la faveur d'un apport continental plus important.

Le paysage qui correspond à la paléobiocénose à lingules et à lamellibranches montre des affinités marines plus évidentes que celui de la paléobiocénose à crustacés. Il évoque les grandes étendues des vasières littorales.

V – LES NIVEAUX ARGILEUX À ORGANISMES TERRESTRES

1. LE NIVEAU ARGILEUX N° 2 D'ADAMSWILLER

Ce niveau argileux occupait presque toute l'étendue du front de taille de l'exploitation principale des Grandes Carrières G. Rauscher à Adamswiller (carrière n° 8 de l'Annexe I). Il était situé vers le milieu du Grès à meules. Les bancs de grès surincombants l'érodaient fortement. Par endroits sont épaisseur dépassait 1 m (Pl. XXXV, fig. 4).

Le sédiment était formé par une succession de lamines d'épaisseur variable (Fig. 32). Les lamines d'ordre millimètrique étaient rares. Quelques passées gréseuses s'intercalaient dans le sédiment argileux. Elles se terminaient en biseau à l'approche d'un seuil de faible amplitude qui accidentait la surface du banc de grès sur lequel reposait le niveau étudié (Pl. XXXI, fig. 4). Le courant responsable de leur dépôt a donc été influencé par le paléorelief.

La faune aquatique était pauvre. Elle ne consistait qu'en esthéries. Celles-ci étaient localisées dans deux niveaux principaux de la partie inférieure du profil (lamines 1 et 4). Elles s'y trouvaient rassemblées par milliers au sommet des lamines.

La flore était riche et bien conservée. Près de la base du niveau argileux, elle consiste essentiellement en grands rameaux de Voltzia avec des cônes femelles entiers. Plus haut se rencontrent deux autres lamines riches en fragments de Voltzia. De très nombreuses graines leur sont associées (lamines 3 et 6). Il est possible que les cônes femelles et les graines fassent partie du même cycle de la végétation. Cela supposerait un taux de sédimentation aussi élevé que pour les niveaux argileux à crustacés. La partie supérieure du niveau argileux est très pauvre en restes végétaux. Cependant des systèmes radiculaires in situ traversent les lamines du sommet. Ils indiquent l'assèchement final de la nappe d'eau.

Malgré la pauvreté des restes organiques, ont peut saisir l'histoire de ce niveau argileux. Les esthéries furent les seuls organismes aquatiques à pouvoir s'épanouir dans le milieu. Elles furent, à deux reprises, l'objet d'une mortalité massive. Seuls quelques individus parvinrent à survivre à ces catastrophes, les conditions de vie devenant sans doute de plus en plus difficiles dans la nappe d'eau. La végétation, essentiellement formée de Voltzia, a prospéré aux abords immédiats du milieu aquatique. Celui-ci s'est progressivement asséché, permettant l'implantation de végétaux palustres.

2. CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES NIVEAUX ARGILEUX À ORGANISMES TERRESTRES

Les niveaux argileux à faune aquatique restreinte ou absente sont très fréquents dans le Grès à meules. Ils n'ont pas de localisation stratigraphique précise. Ils sont variables tant par

CARACTÈRES SÉDIMENTOLOGIQUES CARACTÈRES PALÉONTOLOGIQUES Grès sain rouge cannelures d'érosion de direction N 120 17 Argilite rouge à sommet vert Argilite rouge _____ Rares esthéries 16 Argilite verte 15 14 Argilite verte 13 Argilite verte Argilite gréseuse verte 12 à litage oblique Argilite gréseuse verte 11 à "convolute lamination " Grès argileux jaunâtre _____ Nombreux fragments végétaux (Voltzia) 10 figures d'impact de direction N 140 9 Argilite verte 8 7 6 5 Argilite verte 4 Argilite verte _____ Très nombreuses esthéries 3 Argilite verte. Végétaux orientés à N140_____Branches et écailles femelles de Voltzia. graines 2 Argilite verte_____Nombreuses branches et cônes femelles de Voltzia 1 Argilite verte _____Très nombreuses esthéries Grès sain gris

Figure 32 - Relevé paléoécologique du niveau argileux nº 2 d'Adamswiller (Grandes Carrières G, RAUSCHER - front SW - juillet 1966)

10 cm

leurs dimensions que par leurs caractères pétrographiques. Leur contenu paléontologique les distingue des autres niveaux argileux : il consiste en effet essentiellement en végétaux et en Arthropodes terrestres. Parmi les nombreux niveaux exploités, quelques uns méritent une mention particulière.

A Hangviller (carrière n° 20 de l'Annexe I), un niveau argileux a livré, à côté de nombreux restes végétaux (fougères, Equisetites, Schizoneura, Voltzia, Yuccites), des scorpions et des myriapodes. La faune aquatique n'était représentée que par un unique exemplaire de poisson et des pontes du genre Palaeoxyris.

Dans la même localité (carrière n° 21 de l'Annexe I), fut exploité un niveau argileux épais de 1,50 m. Il formait la partie supérieure du remplissage d'un chenal (Fig. 26), Quelques Acritarches et de rares esthéries étaient les seuls organismes aquatiques présents. Le sommet du profil montrait de magnifiques systèmes radiculaires, recoupant verticalement le litage du sédiment. Les racines formaient des cylindres larges de quelques millimètres et longs de plusieurs décimètres qui émettaient de place en place des ramifications horizontales s'insinuant entre les lamines. Le peuplement végétal était relativement dense car les racines étaient distantes en moyenne de 20 à 50 cm les unes des autres.

A Petersbach (carrière n° 9 de l'Annexe I), au sommet d'un niveau argileux, la surface d'un petit lit gréseux montrait côte à côte des fentes de dessication, des empreintes de pas de Vertébrés et des racines in situ.

Dans la même localité, un niveau argileux d'une carrière abandonnée (carrière n° 10 de l'Annexe I) renfermait de magnifiques rhizomes d'équisétales. Aucun fossile animal n'y fut rencontré.

Ainsi, dans tous les cas, ces niveaux argileux sont caractérisés par la prédominance des organismes terrestres, surtout des végétaux, sur la faune aquatique.

3. LE MILIEU DE DÉPÔT

La pauvreté de la faune aquatique des nivcaux argileux à organismes terrestres peut s'interpréter de deux manières : soit que le milieu ait été physico-chimiquement défavorable à la vie, soit qu'un obstacle topographique se soit opposé à son peuplement. Le premier cas semble avoir été le plus fréquent. En effet, le niveau argileux n° 1 d'Adamswiller et celui de Bust illustrent, de la base vers le sommet du profil, le passage de la paléobiocénose à crustacés à une association presque exclusivement formée d'organismes terrestres. Le confinement croissant des eaux y avait progressivement éliminé la faune aquatique. Le même phénomène a dû intervenir au cours du dépôt des niveaux argileux à organismes terrestres, dont les teneurs en bore sont généralement un peu plus élevées que celles des autres niveaux (Fig. 39). La présence de pseudomorphoses de cristaux de sel au sommet d'un shale à végétaux (Pl. XXXVI, fig. 1) en apporte une preuve évidente. Seuls quelques êtres aquatiques particulièrement résistants ont pu survivre dans de telles conditions : les poissons, les larves d'insectes et les esthéries.

Le paysage évoqué par ces deux catégories de niveaux argileux est semblable. Il consistait en nappes d'eau d'étendue restreinte, étangs saumâtres ou lagunes, dont la durée d'existence n'excédait pas quelques saisons ou quelques années. Elles étaient bordées par une végétation palustre d'équisétales et de gymnospermes. Des insectes, des myriapodes et des scorpions vivaient sur les berges et étaient accidentellement entraînés dans les eaux. Des Vertébrés traversaient la région à la faveur d'une faible tranche d'eau. La nature du peuplement aquatique était essentiellement conditionnée par le degré de confinement du milieu.

VI - CONCLUSION SUR LES NIVEAUX ARGILEUX DU GRÈS À MEULES

1. L'étude sédimentologique et paléoécologique des nivcaux argileux du Grès à meules a permis de reconnaître trois catégories de milieux de dépôt : celui des lagunes à crustacés, celui des lagunes et des étangs à organismes essentiellement terrestres et celui des vasières littorales à lingules et à lamellibranches. Leurs caractères sont résumés dans le tableau IX.

TABLEAU IX

Récapitulation des principaux caractères des niveaux argileux du Grès à meules

Caractères paléoécologiques	Localisation stratigraphique	Mode de gisement	Caractères des lamines	Faune	Flore	Milieu de dépôt
Paléobiocénoses à crustacés	essentiellement dans la moitié inférieure du Grès à meules	dépôts de chenaux ou de cuvettes	lamines millimé- triques fréquentes	faune aquatique abondante et variée dans la partie inférieure du niveau ; organismes fouis- seurs rares	abondante dans la partie su- périeure du niveau	bras morts, étangs sau- mâtres ou lagunes
Paléobiocénoses à lingules et à lamellibranches	au sommet du Grès à meules	dépôts de grande ex- tension horizon- tale	lamines généra- lement épaisses	faune aquatique pauvre en espèces mais riche en in- dividus ; organismes fouis- seurs abondants	peu abondante	vasières littorales
Associations d'organismes terrestres	à tous les ni- veaux du Grès à meules	dépôts d'exten- sion va- riable	lamines épaisses, parfois millimé- triques	Arthropodes ter- restres ; rares formes aquatiques (es- théries, larves d'insectes, poissons)	très abondante (racines in situ)	bras morts, étangs sau- mâtres ou lagunes

La répartition des organismes aquatiques montre que les échanges de faune étaient faciles et fréquents entre les différents milieux. Ceuxi-ci constituaient les éléments d'un même paysage. Ils évoquent l'image d'une vaste plaine côtière parsemée de flaques d'eau temporaires. Chaque lagune, chaque étang avait sa physionomie propre selon sa situation géographique, la qualité de son approvisionnement et la nature de son peuplement. Lorsque les influences marines devenaient prépondérantes, des vasières littorales s'installaient. Leur localisation au sommet du Grès à meules annonce la sédimentation marine du Grès argileux.

2. Les niveaux argileux, constitués par une succession de lamines, se sont formés à partir d'apports détritiques intermittents. Entre deux apports successifs, les eaux stagnaient, provoquant parfois une mortalité massive des organismes aquatiques. Ces fluctuations de la sédimentation sont enregistrées à la fois par les caractères pétrographiques, géochimiques et biologiques des lamines.

3. L'évolution du milieu de dépôt au cours du temps est inscrite dans la succession des lamines. Dans les niveaux argileux à crustacés, elle s'exprime dans le relais d'une riche faune aquatique par une végétation palustre. Elle se répercute dans la géochimie du sédiment dont les variations traduisent la concentration du milieu.

La convergence des données de la sédimentologie, de la paléontologie et de la géochimie permet de saisir l'histoire de ces nappes d'eaux saumâtres qui se confinent et s'assèchent au cours du temps.

4. L'étude des cycles biologiques et la combinaison des observations sédimentologiques et paléontologiques permettent d'apprécier le taux de sédimentation correspondant à ces niveaux de quelques décimètres d'épaisseur. Le dépôt a pu s'effectuer, suivant les cas, en quelques saisons ou en quelques années.

CHAPITRE 4

LES NIVEAUX CARBONATÉS

Les roches carbonatées occupent une place discrète dans la sédimentation du Grès à meules. Elles s'y rencontrent sous deux formes : soit en bancs lenticulaires, soit, plus fréquemment, à l'état de brèches de remaniement. Leur coloration brune (HUE 10 Y R 4/4 de la Charte internationale des couleurs des roches) ou jaunâtre (HUE 1L Y R 6/6) est caractéristique et permet de les repérer aisément à l'affleurement. En raison de la grande dureté de ces niveaux, les carriers les qualifient de "Eisen" (en allemand, fer).

I – SÉDIMENTOLOGIE DES NIVEAUX CARBONATÉS

Les caractères sédimentologiques des niveaux carbonatés sont extrêmement variables.

1. MODES DE GISEMENT

a) LES NIVEAUX CARBONATÉS NON REMANIÉS

Dans le Grès à meules, les niveaux carbonatés conservés sur le lieu même de leur dépôt sont rares. Il leur correspond plusieurs modes de gisement.

- Les niveaux carbonatés peuvent former des bancs lenticulaires dans des chenaux du Grès à meules (Pl. XXXI, fig. 3). Leur largeur est de plusieurs mètres pour une épaisseur de quelques décimètres. Ce mode de gisement est comparable à celui des grès à plantes. Aucun litage n'est visible. La partie basale du niveau carbonaté ravine le fond du chenal qui est généralement garni par un pavage de galets d'argile. Le sommet de la lentille est érodé.

- Les niveaux carbonatés se rencontrent parfois sous forme de petites lentilles interstratifiées dans un niveau argileux. Leur base ravine le sédiment encaissant. On y observe diverses figures sédimentaires, en particulier des cannelures d'érosion et des traces d'impact. Le contact du sommet de la lentille carbonatée avec le sédiment argileux est franc.

- Un troisième mode de gisement a été observé à Petersbach (carrière n° 9 de l'Annexe I). Un magnifique champ de ripple-marks, développé au sommet d'un banc de grès sain, était surmonté par un grès argileux vert passant progressivement à un grès carbonaté. L'ensemble, de section lenticulaire, avait une épaisseur de 15 cm et se terminait par une surface à ripple-marks.

Dans tous les cas, les niveaux carbonatés non remaniés apparaissent comme des dépôts de faible extension horizontale. Leur formation semble liée à des points bas de la paléotopograghie: chenaux ou cuvettes de décantation des particules argileuses.

b) LES NIVEAUX BRÉCHIQUES CARBONATÉS

Les niveaux bréchiques carbonatés sont fréquents à tous les niveaux du Grès à meules (GALL et GRAUVOGEL, 1968 a). Ils forment des passées irrégulières de faible épaisseur qui ravinent

le sédiment sous-jacent. Leur extension horizontale est généralement réduite. Cependant, à la base du Grès à Voltzia, une telle brèche dolomitique a été trouvée à plusieurs reprises. En particulier PERRIAUX (1961, p. 78) l'a observée dans une douzaine de carrières. C'est pour cette raison que le "banc de brèche dolomitique supérieur" est considéré comme marquant la limite entre les Couches intermédiaires et le Grès à Voltzia.

En dehors de cet horizon de base dont on ne peut, faute d'affleurements, montrer la continuité, les niveaux bréchiques carbonatés sont associés aux autres faciès du Grès à meules. Ils peuvent être localisés dans des chenaux et présentent alors un litage oblique. Ils sont fréquents également à la base des bancs de grès sains ou des grès à plantes.

Les niveaux bréchiques carbonatés proviennent du remaniement de bancs carbonatés déposés à proximité, semblables à ceux décrits précédemment. Ce sont de véritables brèches intraformationnelles. En effet, il fut possible, à plusieurs reprises, d'observer le passage d'une lentille de grès carbonaté à l'horizon remanié qui le surmontait (Fig. 33). Tous les intermédiaires peuvent d'ailleurs se rencontrer entre des dépôts carbonatés peu remaniés, des niveaux bréchiques et des grès plus ou moins "pollués" par une faible teneur en carbonates.



2. CARACTÈRES PÉTROGRAPHIQUES

a) GRANULOMÉTRIE ET COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

Les dimensions des grains détritiques varient dans les mêmes limites que celles des grès (grain moyen entre 0,10 et 0,20 mm). L'origine du matériel est manifestement la même.

Le tableau X donne les pourcentages relatifs des principaux constituants des niveaux carbonatés. Il a été établi par le procédé du comptage par points et complété par le dosage des minéraux aux rayons X. Les résultats mettent en évidence la grande variabilité de la composition minéralogique du sédiment. Suivant les cas, la roche est un grès dolomitique, plus rarement un grès calcareux, ou une dolomie gréseuse.

Les minéraux détritiques - Quartz et feldspaths ont les mêmes caractéristiques que ceux des grès. Dans les niveaux bréchiques, le nourrissage diagénétique des microclines est particulièrement spectaculaire. Les micas sont peu abondants. Le ciment - Le ciment est essentiellement carbonaté. La fraction pélitique peut cependant étre appréciable. La dolomite est plus abondante que la calcite. Elle consiste en rhomboèdres de 30 à 80 μ de côté, dont la périphérie est soulignée par un liseré pélitique et ferrugineux. La calcite forme des plages monocristallines limpides, de taille plus importante, qui se moulent sur les autres minéraux. Elle a recristallisé apparemment après la mise en place du matériel détritique. Dans les niveaux bréchiques, le rapport calcite/dolomite est voisin de l'unité. Les rhomboèdres de dolomite sont alors partiellement remplacés par la calcite à la suite d'un phénomène de dédolomitisation.

TABLEAU X

Composition minéralogique (en %) de quelques dépôts carbonatés du Grès à meules. La fraction indosée correspond aux micas, aux grains lithiques, aux minéraux accessoires et, éventuellement, aux galets d'argile et aux fossiles.

Référence de l'échantillon	Localité	Quartz	Microcline	Calcite	Dolomite	Fraction indosée					
1. Niveaux carbonatés non remaniés											
Ad X	Adamswiller	46	16	6	29	3					
97	Lohr	47	16	18	11	8					
120	Petersbach	52	20	9	13	6					
	2. Galets carbonatés fossilifères										
D1	Phalsbourg	16	9	-	70	5					
D2V	Vilsberg	24	9	2	63	2					
	3. Niveaux bréchiques carbonatés										
Bb	Bust	41	13	18	16	12					
HA 23	Hangviller	45	15	18	18	4					
91	Petersbach	52	31	5	6	6					

Les éléments accessoires - Les grains lithiques sont abondants dans les niveaux carbonatés. Les niveaux bréchiques sont constitués par des fragments plus ou moins argileux de dolomie gréseuse ou de grès dolomitique. Ceux-ci sont mêlés à des galets d'argile et à de rares débris organiques. Parfois s'y rencontrent de fins cylindres dolomitiques, longs de plusieurs millimètres pour un diamètre de 1 à 2 mm. Ils sont pourvus d'une cavité axiale remplie de grands cristaux d'origine géodique. La signification de ces corps reste énigmatique : terriers d'organismes dont les parois ont été consolidés par une sécrétion de l'occupant, ou manchons carbonatés se développant autour de radicelles ?

b) COMPOSITION CHIMIQUE

L'hétérogénéité pétrographique des niveaux carbonatés se retrouve dans leur composition chimique. Elle s'y manifeste par un étalement important des teneurs des différents éléments. L'analyse chimique de la fraction granulométrique inférieure à 2 μ sera discutée au chapitre D. Il faut signaler dès à présent, que les teneurs en éléments majeurs et en éléments traces sont voisines de celles des grès dolomitiques du Muschelsandstein.

3. CONCLUSION À L'ÉTUDE SÉDIMENTOLOGIQUE DES NIVEAUX CARBONATÉS

Par leur faible extension et par leur distribution irrégulière, les niveaux carbonatés apparaissent comme autant d'accidents dans la sédimentation essentiellement détritique du Grès à meules.

- En règle générale, la dolomite est plus abondante que la calcite. Bien que l'on ait décrit quelques cas de précipitation primaire de la dolomite dans des sédiments récents (VON DER BORCH, 1965 ; ILLING et al., 1965 ; SHINN et al., 1965 ; SHINN, 1968), il semble admis que la majorité des sédiments dolomitiques résulte de la transformation de vases calcaires (MICHARD, 1969). Il est possible que les carbonates du Grès à meules aient précipité à l'état de carbonates de calcium. Ultérieurement les solutions interstitielles de la vase auraient provoqué leurs transformation en dolomite. Plus tardivement encore serait intervenu un phénomène de dédolomitisation. - Dans le cas des galets dolomitiques rencontrés à la base du Grès à meules, l'importance de la phase carbonatée (65 % des éléments figurés) qui enrobe les organismes, implique l'existence d'une vase calcaire déposée en même temps que les éléments détritiques. Dans les niveaux moins riches en carbonates (20 à 35 % des éléments figurés), la cimentation des grains détritiques a pu se réaliser plus tardivement à partir des ions en solution dans le milieu de sédimentation. Elle est fonction de la porosité de la roche. Pratiquement nulle dans un sédiment argileux, cellelà est maximum dans les grès. Les lentilles gréseuses interstratifiées dans un niveau argileux ont ainsi pu capter les ions Ca et Mg des nappes qui circulent dans le sol.

- Les niveaux carbonatés du Grès à meules rappellent ceux du Muschelsandstein. Cependant les fréquents remaniements dont ils sont l'objet indiquent un environnement beaucoup plus instable.

II – PALÉONTOLOGIE DES NIVEAUX CARBONATÉS

1. LA FAUNE DES NIVEAUX CARBONATÉS

Dans la région étudiée, les niveaux carbonatés non remaniés n'ont jamais livré de restes organiques. Tous les fossiles récoltés dans ce faciès proviennent de galets dolomitiques ou de niveaux bréchiques. A plusieurs reprises, des découvertes sporadiques de coquilles y furent signalées (SCHUMACHER; 1891; GRAUVOGEL, 1951c; PERRIAUX, 1961). Des observations analogues furent faites dans le Sud des Vosges (BRACONNIER, 1883; MAUBEUGE, 1959; DURAND et JURAIN, 1968, 1969), en Sarre et dans le Palatinat (STAESCHE, 1927; SCHAD, 1934; E.M. MÜLLER, 1969, renseignement oral).

Une prospection systématique de ces niveaux dans le Nord des Vosges a permis d'étendre substantiellement la liste des fossiles rencontrés (GALL et GRAUVOGEL, 1968 a ; KOEHN-ZANINETTI, BRÖNNIMANN et GALL, 1969). Elle est donnée par le tableau XI.

2. INDICATIONS FOURNIES PAR LES ORGANISMES DES NIVEAUX CARBONATÉS

Les organismes des niveaux carbonatés sont intéressants dans la mesure où leur autochtonie peut être démontrée. Les foraminifères ont été rencontrés dans des galets dolomitiques occupant des chenaux de la base du Grès à meules (carrières n° 24 et 25 de l'Annexe I). Ils sont associés à Myophoria vulgaris. La taille des galets (jusqu'à 1 m de diamètre) prouve qu'ils proviennent d'un dépôt qui s'est effectué dans la proximité immédiate de l'affleurement. La conservation des Mollusques des niveaux bréchiques carbonatés est souvent défectueuse. Elle est due à une dissolution partielle des coquilles après leur enfouissement. Cependant les coquilles ne sont jamais brisées et ne présentent pas de traces apparentes d'usure. Leur transport a dû être bref. Il fut d'ailleurs généralement incapable de provoquer une usure mécanique sensible des fragments de roches carbonatés.

La faune des niveaux carbonatés peut donc être considérée comme sub-autochtone.

L'association de foraminifères agglutinants (Glomospirella et Glomospira) avec des Lagénidés définit un milieu franchement marin (BANDY, 1960). La présence de Myophoria corrobore cette conclusion. D'autre part, les Mollusques des niveaux bréchiques comprennent des formes qui se rencontrent normalement dans les faciès marins, éventuellement saumâtres, du Muschelkalk.

En résumé, la faune des niveaux carbonatés du Grès à meules reflète la proximité d'un environnement marin.

III – LES MILIEUX DE DÉPÔT DES NIVEAUX CARBONATÉS

Dans son mémoire sur les Vosges gréseuses, PERRIAUX (1961), reprenant l'interprétation de MÜLLER (1954) à propos des zones violettes, attribue le "banc de brèche dolomitique supé-140

TABLEAU XI

Liste et répartition des genres et des espèces rencontrés dans les niveaux carbonatés du Grès à meules.

Genres et espèces	Renseignements tirés de la bibliographie	Observations personnelles
FORAMINIFÈRES		
Glomospirella oscillens KOEHN-Z., BRÖNN. et GALL Glomospirella aff. spirillinoides (GROZ. et GLEBOV.) Glomospira sp. Agathammina aff. austroalpina KRTOLLMANN et TOL. Lagénidés		Phalsbourg, Vilsberg Phalsbourg, Vilsberg Phalsbourg, Vilsberg Phalsbourg, Vilsberg Phalsbourg, Vilsberg
LAMELLIBRANCHES		
Gervillia costata SCHLOT. Gervillia socialis SCHLOT. Gervillia sp. Pectinacea indét. Mycoboria vulsaris (SCHLOT.)	Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 11) Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 11) Schorbach (PERRIAUX 1961, p. 87)	Bust Ratarshach Vilebarg
Myophoria sp.	Schorbach (PERRIAUX 1961, p. 87) Vilsberg (GRAUVOGEL 1951 c, p. 2033)	Petersbach
Homomya sp. Pleuromya sp.		Petersbach Bust
GASTÉROPODES		
Naticopsis gaillardoti LEFR. Worthenia albertii ZIETEN	Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 11) Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 11)	Petersbach
Loxonema obsoletum (ZIETEN)		Lohr
OSTRACODES		
Ces formes ont uniquement pu être observées en plaque mince et sont indéterminables		Phalsbourg, Vilsberg Hangviller
VERTÉBRÉS		
Fragments d'os		Phalsbourg, Petersbach

rieur" au remaniement d'une croûte calcaire développée dans un sol fossile. Cependant, un certain nombre de niveaux, en tous points comparables au banc de brèche dolomitique supérieur," renferment une faune marine. Ces découvertes ne permettent pas de généraliser l'hypothèse d'une origine pédologique de ces formations. En effet, la présence d'organismes marins, Foraminifères et Mollusques, prouve qu'une partie au moins des niveaux carbonatés s'est déposée dans un milieu en communication avec la mer. D'après le faible volume occupé par ces dépôts, leur extension initiale devait être réduite à celle de lagunes ou de chenaux. Situés dans la région marginale de l'aire de sédimentation, ils étaient fréquemment érodés ou remaniés par les apports continentaux. Aussi se rencontrent-ils généralement à l'état de niveaux bréchiques associés aux faciès les plus détritiques du Grès à meules : grès à plantes et base des bancs de grès sains.

Les niveaux carbonatés non remaniés ne renferment aucune faune. Seule la nature du ciment les distingue des autres grès. La précipitation des carbonates a dû se produire très rapidement après le dépôt de la phase gréseuse, car ils ne diffusent jamais dans les roches encaissantes. Les eaux du milieu de sédimentation étaient donc saturées en ions Ca et Mg.

Toute une gamme d'environnements répond à de telles conditions (SANDERS et FRIEDMAN, 1967). En dehors du milieu marin déjà évoqué, une sédimentation calcaire peut s'effectuer dans des dépressions continentales lorsque l'évaporation l'emporte sur l'évacuation. Le phénomène peut être accéléré par l'activité de microorganismes.

Un tel mécanisme sédimentaire se conçoit aisément dans le paysage du Grès à meules parsemé d'étangs et de lagunes. L'assèchement de ces étendues d'eaux pouvait localement mener à la précipitation des carbonates et même à celle des évaporites. Cette succession fut effectivement observée dans un chenal du Grès à meules où des cristaux de sel avaient laissé leurs empreintes sur le toit d'un shale dolomitique (Fig. 26). Les concentrations que supposent de tels milieux les rendaient hostiles au développement d'une faune aquatique.

En résumé, la mise en place des niveaux carbonatés a pu se réaliser dans deux environnements bien distincts : soit en milieu marin, soit dans des flaques d'eaux temporaires. Les niveaux bréchiques peuvent provenir du remaniement de l'un ou de l'autre de ces dépôts.

Ces deux mécanismes ne sont contradictoires qu'en apparence. En effet, les ions Ca et Mg proviennent, en dernière analyse, de l'altération des reliefs continentaux. Suivant les caractères

10

du réseau fluviatile et l'importance de la pluviosité, ils seront acheminés plus ou moins loin vers l'aval. Si le drainage est suffisant, ils atteindront finalement la mer. Survient une période d'aridité, ils seront piégés en cours de chemin dans des dépressions fermées.

La pluralité d'origine des niveaux carbonatés explique la grande variabilité qui s'observe dans leur comportement sédimentologique et géochimique.

IV - CONCLUSION

Aux dépôts carbonatés du Grès à meules et à leurs produits de remaniement correspond toute une gamme d'environnements. Ils s'intègrent facilement dans le paysage d'une plaine côtière parsemée de nappes d'eau, de lagunes, d'étangs saumâtres ou sursalés dont le caractère marin s'accentuait vers l'aval. Ainsi la diversité des aspects des niveaux carbonatés ne résulte en dernière analyse que des variations locales des conditions de dépôt, dépôt qui se produit à partir des ions en voie de migration dans le paysage et précipités plus ou moins tôt au cours de leur cheminement.

LE PAYSAGE DU GRÈS À MEULES

Au terme de l'étude des différents milieux de dépôt mis en évidence dans le Grès à meules, il convient de les situer dans le cadre de leur environnement physiographique régional.

1. L'ENVIRONNEMENT DELTAÏQUE

Le tableau XII rappelle brièvement les caractères des quatre principaux faciès rencontrés : les grès sains, les grès à plantes, les niveaux argileux et les niveaux carbonatés.

TABLEAU XII

Récapitulation des caractères des principaux faciès du Grès à meules : l'environnement deltalque.

Faciès	Caractères pétrographiques	Caractères stratonomiques	Vitesse de la sédimentation	Caractères paléontologioues	Milieux de dépôt	
grès sains	grès feldspa- thiques bien classés	bancs lenti- culaires lamines généra- lement subhori- zontales	rapide	néant	barre d'embouchure	
grès à plantes	grès feldspa- thiques mal classés	remplissage de chenaux litage absent ou oblique	très rapide	fossiles allochtones et continentaux (Vertébrés, végétaux)	dépôt fluviatile de crue	
niveaux argileux	argilites et argilites gré- seuses	interstrates où dépôts de chenaux	moyenne (1 å plusieurs dm par année)	organismes autochtones euryhalins flore palustre	étangs saumâtres, lagunes ou vasières litto- rales	
niveaux carbonatés	grès dolomiti- ques ou dolo- mies gréseuses	dépôts lenti- culaires ou brèches de remaniement	?	faune marine ou faune absente	dépôt marin ou dépôt de cuvette continentale	

La sédimentation du Grès à meules présente un caractère fondamentalement détritique (grès fins et argilites). Elle s'est faite sous une faible tranche d'eau car les indices d'émersion sont fréquents : fentes de dessication, racines in situ, empreintes de pas de Vertébrés, présence d'organismes terrestres. La faune aquatique consiste en un mélange de formes d'eaux saumâtres ou, plus rarement, dulcicoles, et d'organismes d'origine marine. Ces derniers sont prépondérants et se montrent particulièrement tolérants aux variations de salinité du milieu. A proximité des nappes d'eau prospérait une végétation variée.

Les dépôts du Grès à meules correspondent donc à une aire de sédimentation active située à la frontière entre les domaines marins et continentaux. Ces caractères définissent les environnements deltaïques.

De nombreux travaux ont été consacrés aux deltas actuels et à leurs équivalents anciens. Parmi les premiers il convient de citer ceux de JOHNSTON, (1921), RUSSELL (1939), FISK et al. (1954), TRICART, (1955), DUBOUL-RAZAVET (1956), SHEPARD (1960), SCRUTON (1960) COLEMAN et GAGLIANO, (1965), MOORE (1966), KOLB et VAN LOPIK (1966).

L'environnement deltaïque actuellement le mieux étudié est celui du Mississippi. Au cours des temps holocènes, ce fleuve a édifié en bordure du golfe du Mcxique une plaine deltaïque dont la superficie dépasse celle des Vosges. J'ai eu l'occasion de séjourner, en 1968, dans le delta du Mississippi et de me familiariser avec ce vaste paysage situé à quelques décimètres seulement au-dessus du niveau de la mer. Certes, la nature des sédiments transportés, essentiellement des lutites, et les conditions climatiques plus humides, sont différentes de celles du Buntsandstein. Mais la physiographie de la partie subaérienne du delta est comparable. Elle consiste en un réseau de chenaux actifs ou abandonnés (bayous) séparés par des nappes d'eau d'importance variable : lacs, étangs saumâtres ou lagunes, où les influences marines sont plus ou moins sensibles. Une abondante végétation croît sur les levées naturelles, les fles et les marais.

Dans la nature actuelle, c'est sans doute l'un des paysages qui se rapproche le plus de celui des Vosges à l'époque du Grès à meules.

2. LES MODALITÉS DE LA SÉDIMENTATION DELTAÏQUE

L'accumulation du matériel détritique de ces puissantes formations deltaïques se fait nécessairement sous une épaisseur d'eau à la fois faible et pratiquement constante. Ceci suppose une subsidence générale de la région. Il n'est nullement indispensable que cette subsidence soit régulière sur les différentes parties de la plateforme littorale. En effet, les migrations latérales des chenaux qui divaguent sur la plaine deltaïque étalent le matériel. C'est ainsi que le cours principal du Mississippi emprunta six trajets successifs au cours des 5.000 dernières années (Mc FARLAN, 1961). Le même mécanisme des divagations fluviatiles fut mis en évidence dans des dépôts anciens (BERSIER, 1953, 1958). Il explique de façon satisfaisante la distribution régulière d'un matériel d'origine continentale sur de vastes plaines d'épandage en voie de subsidence.

Le paysage correspondant est donc essentiellement changeant, même à l'échelle humaine. Des crues catastrophiques ou des ouragans modifient le tracé des chenaux et remanient les sédiments antérieurement déposés. Le matériel transporté est abandonné en vrac en cours de chemin, ou vanné près des embouchures sous forme de barres. Dans les zones délaissées par le delta actif s'installent des bras morts, des étangs saumâtres ou des lagunes. La sédimentation y est fine et calme. Une riche faune aquatique y prospère et la végétation se développe à proximité. Mais l'existence de ces nappes d'eau est brève. Elles s'assèchent sous l'effet d'une évaporation intense ou se colmatent lors d'un changement du réseau hydrographique ; à moins que sous l'influence de la subsidence régionale, elles ne deviennent l'objet d'une incursion marine.

Dans un tel paysage, la reprise mécanique de ce qui vient d'être déposé est de règle. De plus, à un moment donné, zones de dépôt et zones de remaniement voisinent. Il est donc illusoire de vouloir établir des corrélations entre niveaux éloignés les uns des autres. A l'échelle géologique, chaque banc de grès, chaque niveau argileux ou carbonaté correspond à un dépôt quasi instantané : quelques heures, quelques jours, quelques années. Mais entre deux bancs successifs, rien ne permet de savoir si l'interruption correspond à l'intervalle qui sépare deux crues ou à des siècles de silence.

Dans l'élaboration d'un complexe fluvio-marin, il est difficile de départager les influences du continent et celles de la mer. On distingue communément le cas des estuaires et celui des deltas. Cependant, dans la nature actuelle il n'est pas toujours possible de différencier les deux types d'embouchures (BERTHOIS, 1958 ; OTTMANN, 1965 ; DERRUAU, 1967). Ni la nature de leurs dépôts, ni la configuration des bras tributaires ne sont des caractères déterminants. On sait qu'au cours de son histoire une embouchure peut passer successivement et à plusieurs reprises par une phase deltaïque et une phase estuarienne (PIMIENTA, 1958 ; MORGAN, 1967) à la suite des fluctuations climatiques ou des variations du niveau de la mer. Cette difficulté à distinguer estuaires et deltas est encore plus grande quand on s'adresse à des dépôts fossiles. En fait, l'usage semble maintenant bien établi de conserver le terme de sédimentation deltaïque pour désigner les grandes accumulations de matériel détritique par le jeu de la migration des chenaux fluviatiles sur une basse plaine littorale.



Figure 34 - Bloc - diagramme illustrant la sédimentation deltaïque dans le Nord des Vosges à l'époque du Grès à meules.

(Les hauteurs sont très exagérées)

3. L'ÉVOLUTION PALÉOGÉOGRAPHIQUE DU GRÈS À MEULES

Le paysage du Grès à meules s'intègre facilement dans l'évolution paléogéographique du Trias de faciès germanique. En effet, les Couches intermédiaires situées sous le Grès à Voltzia présentent un régime continental généralisé (PERRIAUX, 1961). Au-dessus, le Muschelkalk correspond à une transgression marine. Ainsi, après le piémont à caractère lacustre et fluviatile et avant l'invasion de la mer, s'installe progressivement dans les Vosges du Nord un régime deltaïque.

Le domaine amont de la plaine deltaïque était couvert par une végétation variée et peuplé d'Amphibiens. Des vasières à lingules et à lamellibranches bordaient la région littorale. Localement elle était le siège d'une sédimentation carbonatée à foraminifères et à mollusques. Entre ces deux domaines s'étendait le paysage amphibie des chenaux, des étangs et des lagunes (Fig. 34).

Ces différents paysages qui s'étalent dans l'espace se succèdent également dans le temps. Dans le Nord des Vosges, les lagunes à crustacés sont localisées dans la moitié inférieure du Grès à meules. Elles sont ensuite relayées par les vasières littorales à lingules et à lamellibranches. A la même époque, se déposent, sur la rive droite du Rhin, les sédiments marins du Röt (ORTLAM, 1967). Il apparaît ainsi qu'au cours du Buntsandstein supérieur, les influences marines se sont déplacées de l'Est vers l'Ouest. Dans la région étudiée, le sommet du Grès à meules est presque partout caractérisé par l'installation d'une abondante végétation. Celle-ci n'a pu prendre une telle extension qu'à la suite d'un ralentissement du mécanisme deltaïque. Il semble qu'à la fin du dépôt du Grès à meules un équilibre de courte durée se soit réalisé. Mais dès la base du Grès argileux les influences marines l'emportent. C'est l'annonce de la transgression de la mer du Muschelkalk.

B – LE GRÈS ARGILEUX

Le Grès à Voltzia supérieur ou Grès argileux s'oppose par de nombreux caractères au Grès à meules. La fréquence des faciès argileux et dolomitiques, la régularité de la stratification et le contexte paléontologique indiquent un changement notable des conditions de dépôt.

LE CONTACT GRÈS À MEULES - GRÈS ARGILEUX

A l'affleurement, le contact entre les deux termes du Grès à Voltzia a généralement la netteté d'un trait de couteau (Pl. XXX, fig. 1). Le sommet du Grès à meules correspond à une surface plane et subhorizontale, discordante par rapport aux bancs sous-jacents. A ce niveau se rencontre, dans toute la région étudiée, un horizon à taches de décoloration contenant de nombreuses racines in situ (GALL et GRAUVOGEL, 1967 c) (Pl. XXVIII, fig. 3-4). Il est fort probable qu'une intense pédogenèse ait été à l'origine de l'aplanissement de la topographie. Elle a pu être entretenue durant un intervalle de temps prolongé, à la suite du ralentissement de la subsidence régionale.

Le Grès argileux débute dans plusieurs localités par un horizon à faune marine (carrières n° 3, 5, 6, 8, 9, 15 de l'Annexe I). Celui-ci est traversé par de nombreux terriers d'organismes fouisseurs qui atteignent fréquemment le sommet du Grès à meules. Cette transgression de la mer dépasse en amplitude les précédentes incursions marines. Elle fut possible grâce au nivellement de la topographie intervenue à la fin de l'époque du Grès à meules. Elle va fortement influencer la sédimentation du Grès argileux.

L'épaisseur du Grès argileux est généralement plus faible que celle du Grès à meules. Elle est en moyenne de 5 m dans la région étudiée. Les variations de puissance de cette formation ont permis à MÜLLER (1954) et à PERRIAUX (1961) de dresser des cartes d'isopaques où apparaît nettement la topographie triasique formée, à l'échelle de la chaîne des Vosges, par une succession de seuils et de bassins.

D'après des critères pétrographiques et paléontologiques, trois faciès ont été reconnus dans le Grès argileux : les grès à dalles, les bancs argileux et les bancs carbonatés. La description de ces faciès sera plus succincte que pour ceux du Grès à meules et ceci pour plusieurs raisons. Leur étude pétrographique et sédimentologique fait en effet appel à des caractères et à des concepts déjà définis dans les chapitres précédents. D'autre part, la liste des organismes est banale et bien connue. Enfin, la reconstitution du milieu de dépôt du Grès argileux a été tentée à plusieurs reprises par différents auteurs (RÜCKLIN, 1954 ; MAUBEUGE, 1959 ; PERRIAUX, 1961 ; BUFFARD, 1968).

CHAPITRE 1

LES GRÈS À DALLES

Le Grès argileux constitue la partie supérieure du front de taille des carrières. Dans ce niveau seuls les bancs de grès sont exploités. En raison de leur faible épaisseur et de leur délit facile, ils sont souvent utilisés pour la confection de dalles. Pour les distinguer sans ambiguité des grès sains du Grès à meules, avec lesquels ils ont une certaine ressemblance, ils seront désignés ici par le terme de "grès à dalles".

I – CARACTÈRES SÉDIMENTOLOGIQUES

1. STRATONOMIE DES GRÈS À DALLES

a) LA STRATIFICATION

Les grès à dalles forment de petits bancs épais de quelques centimètres à plusieurs décimètres ou, plus rarement, de quelques mètres. Ils se suivent généralement tout le long d'un affleurement sans variations d'épaisseur appréciables. Les bancs lenticulaires et les chenaux sont rares. Ce mode de gisement est fondamentalement différent des grands corps gréseux du Grès à meules.

b) LE LITAGE

Les grès à dalles sont constitués par un empilement de fines lamines plan-parallèles et subhorinzontales. Celles-ci sont plus régulières que dans les grès sains et confèrent à la roche un aspect plus homogène. Cette disposition facilite le délit de la roche. Le litage est rarement oblique. Cependant la microstratification entrecroisée et la structure madrée (Fig. 21 et 22) sont fréquentes au sommet des bancs.

c) LES FIGURES SÉDIMENTAIRES

Les figures sédimentaires des grès à dalles sont aussi communes que celles des grès sains.

Figures des semelles ou murs des bancs (sole-marks) - Des pseudomorphoses de cristaux de sel gemme ont été rencontrées (carrière n° 18 de l'Annexe I). Elles renseignent sur l'environnement physico-chimique du niveau argileux sous-jacent. Cependant les indices d'émersion (fentes de dessication) demeurent absents. Les figures dues aux courants sont abondantes : flute-marks, sillons d'érosion ou gouge-channels, cannelures d'érosion ou groovemarks et diverses figures d'impact. La déformation du sédiment peut se traduire par la présence de miches ou pseudo-nodules. L'activité biologique particulièrement intense dans les niveaux sous-jacents a donné naissance à une grande variété de figures visibles sur le mur des grès à dalles : tracés sinueux provoqués par le déplacement de divers organismes (Pl. XXVII, fig. 4), pistes rapportées à des limulidés, empreintes de pas de Vertébrés, etc. Par leur abondance, elles confèrent un aspect tourmenté à la semelle des bancs. Figures observables à l'intérieur des bancs - L'action des courants se manifeste essentiellement à la surface des lamines par la linéation de délit ou parting-lineation (p. 104). Fréquemment, le litage de la roche est perturbé par des organismes fouisseurs. On reconnait, en particulier, les terriers obliques de Rhizocorallium (Pl. XXV, fig. 4) et les terriers verticaux des lingules (Pl. XXVII, fig. 1-2).

Figures du toit des bancs - Le sommet des bancs de grès à dalles est souvent imprécis par suite de l'enrichissement de la roche en matériel argileux. Il correspond parfois à une surface de ripple-marks. Les rides de courant sont fréquentes ainsi que les rides d'oscillation. Celles-ci sont souvent accidentées par des traces d'origine biologique (Pl. XXVIII, fig. 1).

2. ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE DES GRÈS À DALLES

Les couleurs des grès à dalles sont celles des grès sains : le rose (HUE 10 R 4/2 de la Charte internationale des couleurs des roches) et le gris beige (HUE 5 Y 6/2). La couleur rose est la plus fréquente. Elle paraît plus soutenue que dans les grès sains par suite de l'importance accrue de la fraction pélitique.

a) GRANULOMÉTRIE

Le grain moyen, voisin de 0,10 mm, et le classement des grès à dalles ne diffèrent guère de ceux des grès sains((Fig. 20 et Tableau III). Les courbes granulométriques sont parfois bimodales et indiquent alors que le matériel provient de sources différentes. A la base des bancs, les galets d'argilite sont exceptionnels.

b) COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

La composition minéralogique des grès à dalles (Tableau XIII) et les caractères des principaux constituants sont semblables à ceux des faciès gréseux du Grès à meules (Tableaux IV et V). Il s'agit de grès fins feldspathiques dont les éléments proviennent essentiellement de l'altération de roches granitiques et gneissiques. Par rapport aux grès sains, les teneurs en feldspaths, en biotite et en ciment pélitique sont légèrement plus fortes.

TABLEAU XIII

Composition minéralogique (en %) de quelques échantillons de grès à dalles

La fraction indosée concerne les grains lithiques, les restes organiques, les amas phylliteux et divers minéraux accessoires.

Référence de l'échantillon	Localité	Quartz	Microcline	Muscovite	Biotite	Ciment pélitique	F raction indosée
A1	Adamswiller	49	31	1,50	1	5	12,50
H3	Hangviller	50	30	3	2,50	4	10,50
125	Niderviller	49	31	1	1	5	13
RHIZ	Soultz-1B.	58	21	0,50	0,50	12	8

Par augmentation de la fraction argileuse ou des carbonates, les bancs de Grès à dalles passent fréquemment à un grès argileux, à une argile gréseuse ou à un grès dolomitique. Dans la nomenclature de FOLK (1951), ce sont des grès immatures. Lors de leur mise en place, la compétence du milieu était insuffisante pour éliminer entièrement la fraction argileuse. Cette conclusion rejoint celle émise par BUFFARD (1968) à propos du Grès argileux du Sud des Vosges.

c) COMPOSITION CHIMIQUE

Quinze échantillons de grès à dalles ont été analysés. Les résultats sont cohérents et très voisins de ceux des faciès gréseux du Grès à meules. Ils seront interprétés dans le chapitre D consacré à l'étude géochimique du Grès à Voltzia.

II – CARACTÈRES PALÉONTOLOGIQUES

Des restes végétaux peu abondants ont été rencontrés dans les grès à dalles. Il s'agit surtout de fragments de Voltzia. La faune, par contre, bien que mal conservée dans un sédiment détritique, est mieux représentée.

1. LA FAUNE

A plusieurs reprises, les grès à dalles ont livré Lingula tenuissima et des lamellibranches difficilement déterminables appartenant au genre Pleuromya. Les coquilles de ces organismes se rencontrent fréquemment en position de vie, leur grand axe perpendiculaire au litage de la roche. Elles forment des populations monospécifiques, parfois extrêmement denses. Tel est le cas d'un banc de grès à dalles de l'exploitation L. Mertz de Hangviller (carrière n°21 de l'Annexe I) renfermant des centaines de lingules encore en place dans leurs terriers espacés de 1 à 2 cm seulement (Pl. XXVII, fig. 1-2).

2. LES TRACES DE L'ACTIVITÉ BIOLOGIQUE

Les lamines des grès à dalles sont recoupées obliquement ou verticalement par des terriers d'organismes fouisseurs. Ceux-ci deviennent très abondants lorsqu'augmente la fraction argileuse du sédiment. Leur détermination est difficile, exception faite de formes bien caractérisées comme les terriers de Rhizocorallium ou de Lingula.

3. INDICATIONS FOURNIES PAR LES ORGANISMES SUR LE MILIEU DE DÉPÔT

Les lingules sont familières des sédiments meubles de la zone littorale (p. 24). Un habitat analogue semble correspondre à Rhizocorallium, forme caractéristique des eaux peu profondes du faciès ichnologique à Cruziana défini par SEILACHER (1964). D'autre part, différentes espèces de Pleuromya ont été décrites dans les dépôts néritiques du Muschelkalk (BENDER, 1921). La nappe d'eau était donc peu profonde.

Le sédiment était bien aérée comme l'attestent les peuplements, parfois très denses, d'organismes fouisseurs (lingules, Pleuromya, Rhizocorallium, terriers). C'est davantage l'agitation des eaux que la salinité qui devait contrôler leur installation. La faune n'est en effet fréquente que dans les grès à ciment pélitique abondant, déposés dans un milieu de faible énergie. La présence de Rhizocorallium est à cet égard révélatrice. Dans le Grès à meules, cette forme ne se rencontre que dans les niveaux argileux ; elle demeure absente des grès sains. Dans le Grès argileux, elle s'aventure dans les faciès gréseux grâce à la diminution de la compétence des courants.

L'ensemble de ces conditions évoque un environnement littoral.

III – LE MILIEU DE DÉPÔT

Des relations évidentes existent entre grès à dalles et grès sains. Les caractères pétrographiques et sédimentologiques sont voisins. Ils prouvent que le continent demeurait le fournisseur essentiel du matériel détritique.

La succession verticale des figures et des structures sédimentaires dans certains bancs de grès à dalles rappelle celle qui s'observe dans les corps lenticulaires de grès sains (Fig. 25). Elle implique la mise en place du sédiment par un courant qui dépose progressivement sa charge par perte d'énergie. Cependant la compétence des courants était moindre que ceux du Grès à meules : les bancs de grès à dalles sont de faible puissance, la fraction argileuse est impar-faitement éliminée et des organismes fouisseurs peuvent s'installer. La grande extension horizon-

tale des bancs suppose une nappe d'eau plus étendue que celle des embouchures où se déposaient les grès sains. Elle était aussi plus permanente car les indices d'émersion sont absents. D'après la faune, il s'agit d'un milieu marin.

L'enchaînement des deux faciès est facile à reconstituer. A l'époque du Grès à meules, les grès sains s'accumulaient sous forme de barres au niveau des embouchures d'un paysage deltaïque. Ici, un matériel identique est livré aux courants littoraux et aux courants de marée. Il se trouve étalé sur de grandes plages. Les courants et le déferlement des vagues y provoquaient la formation de lamines et l'orientation des particules qui se trouve à l'origine de la linéation de délit. Lorsque l'agitation des eaux diminuait ou que les apports détritiques se ralentissaient, les ripple-marks pouvaient se former, les plages s'envaser et la faune s'installer.

Rien n'illustre mieux ce paysage que les bancs de grès remplis de milliers de lingules en position de vie.

CHAPITRE 2

LES BANCS ARGILEUX

C'est à la fréquence des bancs argileux que le Grès à Voltzia supérieur doit son nom de Grès argileux. En effet, ce faciès est généralement plus important que les deux autres faciès pris séparément : celui des grès à dalles et celui des bancs carbonatés. Il est parfois supérieur aux deux autres réunis puisqu'il peut dépasser 50 % de la puissance totale de la formation. La coloration des bancs argileux est variée : le gris vert (HUE 5 Y 5/2 de la Charte internationale des couleurs des roches), le vert olive (HUE 10 Y 4/2 et 10 Y 5/2), le rouge brun (HUE 5 R 4/2) ou le jaune brun (HUE 5 Y 5/6).

I - CARACTÈRES SÉDIMENTOLOGIQUES

1. STRATONOMIE DES BANCS ARGILEUX

a) LA STRATIFICATION

Les bancs argileux ont une extension bien plus importante que les lentilles argileuses du Grès à meules. Ils se suivent généralement sur toute l'étendue du front de taille. Cependant les passages latéraux à des faciès gréseux ou carbonatés sont fréquents. L'épaisseur des bancs argileux peut atteindre plusieurs mètres ou se réduire, au contraire, à une mince pellicule séparant deux bancs de grès. En particulier, au sommet du Grès à Voltzia s'observe parfois un banc argileux plus épais que les précédents. C'est l'Argile limite qui, par convention, sépare le Buntsandstein du Muschelkalk (WEISS, 1869 b).

b) LE LITAGE

Les bancs argileux du Grès argileux sont généralement finement lités. Les lamines ne présentent cependant jamais la régularité et la constance de celles observées dans le Grès à meules. Elles sont souvent profondément bioturbées. Une multitude de terriers de toutes tailles recoupent alors les lamines et oblitèrent plus ou moins complètement le litage initial.

c) LES FIGURES SÉDIMENTAIRES

En dehors des terriers d'organismes fouisseurs qui bouleversent le litage de la roche, le sommet des bancs argileux a parfois conservé les traces d'une intense activité biologique. Cellesci se découvrent sur la semelle des bancs gréseux ou dolomitiques surincombants : empreintes pectinées, pistes de limulidés, empreintes de pas de Vertébrés etc. D'autre part, la découverte d'un niveau à pseudomorphoses de sel gemme (carrière n° 18 de l'annexe I) apporte d'intéressantes précisions sur le milieu de dépôt.

2. ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE DES BANCS ARGILEUX

Comme pour les niveaux argileux du Grès à meules, tous les intermédiaires se rencontrent entre des argilites, des argilites gréseuses et des grès argileux. Le passage entre ces trois catégories de roches s'observe au sein d'un même banc. La composition minéralogique est en tout point semblable à celle des niveaux argileux du Grès à meules. Mais jamais des plages de barytine ou de pyrite ne furent rencontrées. Au contact d'un niveau dolomitique, les bancs argileux peuvent s'enrichir en carbonates.

La composition chimique du sédiment est étudiée dans le chapitre D ; elle ne fait apparaître aucune différence essentielle avec celle des niveaux argileux du Grès à meules.

II – CARACTÈRES PALÉONTOLOGIQUES

L'intense bioturbation qui affecte la plupart des bancs argileux ainsi que les figures relevées sur les semelles des niveaux surincombants dénotent une activité biologique importante et variée. Elle est l'oeuvre d'une foule d'Invertébrés et de Reptiles. Cependant, les restes corporels de la macrofaune restent toujours extrêmement rares. La flore n'est représentée que par quelques fragments végétaux. La microflore est absente (ADLOFF et DOUBINGER, 1969).

L'unique banc argileux où fut rencontrée une abondante macrofaune provient de la carrière de Soultz-les-Bains. Il s'agit d'une argilite de couleur vert-jaunâtre, épaisse de 10 cm, située à 3,50 m au-dessus de la base du Grès argileux. (Annexe I p. 306). Elle surmonte un grès dolomitique renfermant une riche faune marine qui sera décrite plus loin. Les formes suivantes y furent récoltées : de très nombreux exemplaires de Lingula tenuissima, Myophoria vulgaris, Homomya impressa, un exemplaire de Clytiopsis argentoratensis et des fragments d'os.

Cette association correspond à la paléobiocénose à lingules et à lamellibranches décrite au sommet du Grès à meules (p. 129). Sa localisation au-dessus d'un grès dolomitique fossilifère est d'un grand intérêt paléoécologique. Elle montre qu'une faune marine diversifiée est remplacée par une paléobiocénose à lingules et à lamellibranches, pauvre en espèces mais riche en individus, lorsque le sédiment devient plus argileux et moins carbonaté.

III – LE MILIEU DE DÉPÔT

1. LES CONDITIONS GÉNÉRALES DE L'ENVIRONNEMENT

La rareté des végétaux et l'absence d'indices d'émersion (fentes de dessication, racines in situ) parlent en faveur d'une certaine permanence de la couverture aquatique. Celle-ci devait cependant être de faible profondeur. En effet, la conservation d'empreintes de pas de Vertébrés nécessite à la fois un substrat suffisamment humide pour garder sa plasticité et une tranche d'eau dont l'épaisseur n'entrave pas la locomotion des animaux terrestres. Pour COUREL (1970, p. 301) de telles zones étaient situées "à la limite de la submersion et de l'exondation". La fossilisation des pistes de limules devait exiger des conditions analogues.

L'agitation des eaux devait être suffisante pour entretenir l'aération du sédiment et permettre l'installation des organismes fouisseurs. De plus, celle-ci était favorisée par une vitesse de sédimentation faible.

La faune aquatique, lorsqu'elle est conservée, correspond à la paléobiocénose à lingules et à lamellibranches. Elle caractérise les environnements littoraux. La salinité y était sujette à des fluctuations car, localement, elle s'accroissait jusqu'à la sursaturation en chlorure de sodium dont témoignent les pseudomorphoses de cristaux de sel.

2. LE PAYSAGE

Le paysage de vasière littorale évoqué pour les niveaux argileux du sommet du Grès à meules rend compte de telles conditions d'environnement. Il complète celui des plages marines où s'effectuait le dépôt des grès à dalles. Dans des zones abritées, les particules fines issues du vannage du matériel sableux se rassemblaient et se sédimentaient. L'aération des eaux per-

mettait l'installation de la faune, en particulier d'organismes fouisseurs. Par suite de la faible tranche d'eau qui la recouvrait, la vase était utilisée par les Reptiles comme un lieu de passage. L'évaporation était parfois assez intense pour provoquer localement la sursalure du milieu et la précipitation du chlorure de sodium. Celui-ci était redissous par les eaux responsables de l'épisode sableux suivant.

Un tel environnement est semblable aux plages marines à empreintes de Reptiles et pseudomorphoses de sel gemme, reconstituées par COUREL et DEMATHIEU (1963) dans le Trias moyen de la bordure du Massif Central.

CHAPITRE 3

LES BANCS CARBONATÉS

Au sein du Grès argileux, les bancs carbonatés occupent une place privilégiée par leur grande extension horizontale et par leur riche contenu paléontologique.

I – CARACTÈRES SÉDIMENTOLOGIQUES

1. STRATONOMIE DES BANCS CARBONATÉS

L'épaisseur des bancs carbonatés est de l'ordre de quelques centimètres à quelques décimètres. Elle reste souvent remarquablement constante sur toute l'étendue d'un affleurement. Un banc donné peut se suivre avec les mêmes caractéristiques dans les carrières voisines. Tel est le cas d'un niveau dolomitique situé à environ 2,50 m au-dessus du sommet du Grès à meules et qui se retrouve dans toutes les carrières de la région de Hangviller et de Bust.

Les limites inférieures et supérieures des bancs carbonatés sont généralement imprécises. En effet, les passages verticaux entre différents faciès sont fréquents : un grès dolomitique peut passer progressivement à un grès à dalles ou à un terme plus argileux. Un fin litage n'est apparent dans la roche que lorsque la fraction gréseuse est importante.

Les figures sédimentaires observées à la surface des bancs sont essentiellement dues à l'activité des organismes.

2. PÉTROGRAPHIE DES BANCS CARBONATÉS

Les bancs carbonatés ont une couleur jaune sale (HUE 10 Y R 5/4, 10 Y R 6/6 et 5 Y 5/6 de la Charte internationale des couleurs des roches). Souvent la roche présente dans sa masse de fines mouchetures brunes ou noires caractéristiques.

La granulométrie de la fraction gréseuse est comparable à celle des grès à dalles et du Muschelsandstein (grain moyen voisin de 0,10 mm). Le classement est excellent (Fig. 20 et Tableau III). Lorsque le banc est particulièrement fossilifère, la roche peut prendre un aspect conglomératique par suite de l'existence de galets d'argile ou de dolomie. Dans quelques cas, une texture oolithique a été observée.

Les pourcentages relatifs des principaux constituants des bancs carbonatés sont donnés par le tableau XIV. A titre indicatif, quelques échantillons du Muschelsandstein y figurent également. Comme pour les autres faciès du Grès à Voltzia, les résultats numériques ont été établis par le procédé du comptage par points et complétés par le dosage des minéraux aux rayons X.

Ce tableau fait ressortir les points suivants. La dolomite est normalement le carbonate dominant. Le sédiment est soit une dolomie gréseuse, soit un grès carbonaté. La composition minéralogique est très voisine de celle des galets dolomitiques fossilifères de la base du Grès à
TABLEAU XIV

Composition minéralogique (en %) des bancs carbonatés du Grès argileux et du Muschelsandstein. La fraction indosée correspond aux micas, aux grains lithiques, aux minéraux accessoires et aux fossiles.

Référence de l'échantillon	Référence Localité de l'échantillon		Quartz Microcline		Dolomite	Fraction indosée
	1. Bancs	carbonate	és du Grès ai	rgileux		
G1 N.OC B.LR 126	Adamswiller Hangviller Petersbach Soultz-les-Bains	25 38 23 50	- 16 15 19	8 22 - 2	61 18 57 25	6 6 5 4
	2. Bancs of	carbonatés	du Muschels	andstein		
T3 HAH 8 127 105	Bust Hangviller Soultz-les-Bains Vilsberg	17 31 50 30	3 8 27 12	8 12 - 5	68 43 17 46	4 6 6 7

meules (Tableau X) et des niveaux carbonatés du Muschelsandstein. Par rapport aux niveaux carbonatés non remaniés du Grès à meules, les carbonates sont plus abondants et la fraction gréseuse plus faible. La nature et les caractères des différents minéraux ainsi que la composition chimique de la fraction granulométrique inférieure à 2 μ sont semblables à ceux des niveaux carbonatés du Grès à meules et du Muschelsandstein : les grains de quartz et de feldspath sont moyennement arrondis ou subanguleux, la dolomite est microcristalline, la calcite forme des plages plus étendues.

II – CARACTÈRES PALÉONTOLOGIQUES

La grande majorité des fossiles marins du Grès à Voltzia provient des bancs carbonatés du Grès argileux (v. ALBERTI, 1834 ; VOLTZ, 1836 ; HOGARD, 1837 ; DAUBRÉE, 1852 ; BENECKE, 1877). Cependant, les listes citées par les auteurs anciens ne doivent être retenues qu'avec beaucoup de prudence. En effet, en l'absence de coupe détaillée des affleurements ou par suite de la disparition des gisements, il n'est guère possible de vérifier si les fossiles ont été récoltés dans le Grès argileux ou, au contraire, dans le Muschelsandstein. Un inventaire particulièrement complet de la faune du Grès à Voltzia des Vosges du Nord a été dressé par VOLTZ (1836) dans sa monographie sur la grande carrière de Soultz-les-Bains. Les fossiles marins proviennent du "Grès bigarré supérieur", c'est-à-dire de l'ensemble argilo-gréseux et dolomitique qui surmonte le Grès à meules. D'après les indications de l'auteur, il semble qu'une partie au moins des formes citées ait été trouvée dans un grès dolomitique fossilifère, toujours accessible, situé à 3,20 m au-dessus de la base du Grès argileux.

D'après les données tirées de la bibliographie et d'après ses propres observations, PERRIAUX (1961, p. 90 et 91) établit un tableau des principaux niveaux fossilifères. Il constate que les fossiles marins sont répartis dans trois niveaux principaux situés respectivement au tiers supérieur, à la moitié et dans la partie inférieure du Grès argileux.

Effectivement, dans presque tous les affleurements étudiés dans le cadre de ce travail, furent rencontrés des bancs carbonatés à faune marine. Un niveau particulièrement riche en organismes a été retrouvé à plusieurs reprises à la base du Grès argileux, reposant directement sur le dernier banc du Grès à meules (carrières n° 3, 5, 6, 8, 9, 15 de l'Annexe I). La faune est souvent difficile à déterminer car elle provient des régions sommitales des affleurements, là où l'altération est la plus intense.

Le tableau XV fait état des genres et des espèces bien caractérisés qui ont été trouvés avec certitude dans les bancs carbonatés du Grès argileux. Il a été établi d'après des renseignements bibliographiques (SCHUMACHER, 1891, p. 13 et 1902, p. 87; MAUBEUGE, 1959,

TABLEAU XV

Liste et répartition des genres et espèces rencontrés dans les bancs carbonatés du Grès argileux.

Genres et espèces FORAMINIFÈRES	Renseignements tirés de la bibliographie	Observations personnelles
Glomospirella oscillens KOEHN-Z., BRÖNN, et GALL Glomospirella aff, spirillinoides		Petersbach Petersbach, Adamswiller
Lagénidés		Petersbach
BRACHIOPODES		
L'ingula tenuissima BRONN		Arzviller, Bust, Hang- viller, Soultz-les-Bains Vilsberg
Lingula sp. Coenothyris vulgaris SCHLOT.	Lutzelbourg (SCHUMACHER 1902, p. 87) Lutzelbourg (SCHUMACHER 1902, p. 87) Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 13)	
LAMELLIBRANCHES		
Modiolus credneri DNKR. Modiolus sp. Hoernesia socialis SCHLOT.	Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 13) Vüsberg (PERRIAUX 1961, p. 91) Volsmunster (SCHUMACHER 1891, p. 13)	Adamswiller, Arzviller
Gervillia costata SCHLOT. Gervillia sp.	Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 13) Lutzelbourg, Dannelbourg (SCHUMACHER 1902, p. 87) Bust, Vilsberg, Waldhambach (PERRIAUX 1961, p. 91) Faulguemont (MAUREUGE 1959, p. 102)	Arzviller
Entolium discites (SCHLOT.) Eopecten albertii (GOLDF.) Pectinacea indét. Enantiastreon ef difforme (SCHLOT.)	Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 13)	Adamswiller-Ottwiller Adamswiller Ottwiller Ottwiller
Myophoria vulgaris (SCHLOT.)	Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 13)	Adamswiller, Arzviller, Hangviller, Soultz-les-Bains
Myophoria ovata GOLDF. Myophoria sp.	Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 13) Lutzelbourg, Danneibourg (SCHUMACHER 1902, p. 87) Bust, Vilsberg, Waldhambach (PERRIAUX 1961, p. 91) Faulquemont (MAUBEUGE 1959, p. 102)	Adamswiller, Arzviller, Bust, Hangviller, Petersbach
Myacites cf. albertii VOLTZ Pleuromya elongata (SCHLOT.) Pleuromya sp. Homomya albertii (VOLTZ) Homomya sp. GASTÉROPODES	Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 13)	Soultz-les-Bains Arzviller, 'Petersbach Arzviller Arzviller
Worthenia albertiana ZIETEN Naticopsis gaillardoti LEFR.	Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 13) Volmunster (SCHUMACHER 1891, p. 13) Lutzelbourg (SCHUMACHER 1902, p. 87)	Arzviller, Soultz-les-Bains
Natica sp. Loxonema obsoletum (ZIETEN) Undularia scalata (SCHLOT.) Gastéropodes indét.	Vilsberg (PERRIAUX 1961, p. 91)	Hangviller Arzviller, Soultz-les-Bains Arzviller, Soultz-les-Bains Hangviller
OSTRACODES		
Ces formes uniquement observées en plaque mince sont indéterminables		Soultz-les-Bains
ÉCHINODERMES		
Échinodermes indét.		Adamswiller, Arzviller, Hangviller, Petersbach,
Crinofdes (entroques)	Volmunster (SCHUMACHER 1902, p. 87)	Sourtz-les-Bains
Cidaris cf. grandaeva GOLDF.	LARGEBOURG (SCHUMACHER 1902, p. 87)	Adamswiller, Hangviller,
Ophiures		Hangviller
VERTÉBRÉS		
Fragments d'os	Lutzelbourg (SCHUMACHER 1902, p. 87)	Hangviller, Soultz-les-Bains
TRACES D'ACTIVITE ANIMALE		
iraces de louissement		Adamswiller, Arzviller, Petersbach, Soultz-les-Bains

p. 102-106 ; PERRIAUX, 1961, p. 91) et d'après des observations personnelles. Cette liste faunistique apporte les précisions suivantes.

1/ Il s'agit d'une faune diversifiée, caractéristique d'un milieu marin franc. L'existence d'une salinité normale est attestée par la présence des foraminifères et des échinodermes.

2/ Les organismes sont ceux qui se rencontrent normalement dans le Muschelsandstein de la rive gauche du Rhin (BENECKE, 1877, p. 589; SCHUMACHER, 1890, p. 121) et dans le Röt d'Allemagne (GEHENN, 1962). 3/ Certaines espèces ont déjà été décrites dans les niveaux carbonatés du Grès à meules (p. 141), en particulier les foraminifères et, parmi les Mollusques, Naticopsis gaillardoti et Myophoria vulgaris

III – LE MILIEU DE DÉPÔT

Lors du dépôt des bancs carbonatés du Grès argileux, les conditions d'un régime marin franc se trouvaient pleinement réalisées. Une salinité normale, une aération suffisante des eaux, une vitesse de sédimentation modérée et des ions carbonates abondants permirent l'épanouissement d'une faune diversifiée. Celle-ci a parfois été accumulée en véritables lumachelles par le jeu des courants. Tous les organismes sont des formes d'eaux peu profondes.

L'extension horizontale des bancs est de beaucoup supérieure à celle des lentilles carbonatées du Grès à meules. Il est vraisemblable que les niveaux fossilifères de la base du Grès argileux représentent, dans la région étudiée, un horizon chronostratigraphique. Celui-ci prouverait la généralisation de l'incursion marine sur la surface aplanie du sommet du Grès à meules.

Le milieu de dépôt se situe dans le domaine littoral, là où l'agitation des eaux peut provoquer la formation d'oolithes. La phase terrigène reste cependant importante. Elle provient des apports continentaux ou, plus vraisemblablement, de la reprise des sédiments gréseux déposés à proximité.

LE PAYSAGE DU GRÈS ARGILEUX ET LE PASSAGE AU MUSCHELKALK

Au sein du Grès à Voltzia, l'originalité du Grès argileux apparaît clairement lorsqu'on le compare au Grès à meules. En effet, Grès argileux et Grès à meules s'opposent tant par leur contenu paléontologique que par les caractères de leurs milieux de dépôt.

1. LE RÉGIME MARIN

Tous les faciès du Grès argileux, les grès à dalles, les bancs argileux et les bancs carbonatés renferment une faune dont les affinités marines sont indiscutables. Celle-ci est présente dès la base de cette formation. Les organismes sont ceux du Muschelkalk inférieur. La paléobiocénose à crustacés, les organismes terrestres et les grès à plantes, si fréquents dans l'environnement fluvio-lagunaire du Grès à meules, ne se rencontrent plus jamais. Au paysage deltaïque à flaques succède un régime marin généralisé.

2. LE PASSAGE DE LA SÉDIMENTATION TERRIGÈNE À LA SÉDIMENTATION CARBONATÉE

L'extension et la régularité des bancs du Grès argileux et l'absence d'indices d'émersion impliquent la réalisation d'une nappe d'eau étendue et permanente. Dès la base du Grès à Voltzia supérieur, la mer du Muschelkalk recouvre définitivement le Nord des Vosges. COUREL (1970) a récemment analysé les caractères de ce domaine marin qui, au Trias moyen, atteint la bordure orientale du Massif Central. Une faible tranche d'eau (quelques décimètres d'épaisseur) couvrait, sur des milliers de kilomètres carrés, une pénéplaine antétriasique remarquablement plane. L'auteur emploie l'expression de "transgression pelliculaire".

Dans le paysage subaérien du Grès à meules, les différents faciès étaient parfaitement individualisés car les dépôts s'effectuaient rapidement dans des zones géographiquement bien localisées : chenaux ou flaques. Dans le Grès argileux, les passages latéraux et verticaux entre faciès se font souvent d'une manière graduelle. Cette imbrication des dépôts résulte de leur mise en place sous une nappe d'eau marine où la précipitation des carbonates interfère avec une sédimentation à dominante détritique. Lorsque le matériel terrigène est abondant, se développent les plages de sable des grès à dalles. Elles sont colonisées par des organismes fouisseurs, en particulier par les lingules. Dans des zones plus abritées se sédimentent les particules pélitiques qui sont à l'origine des bancs argileux. Enfin, là où la précipitation des carbonates l'emporte sur les apports détritiques, s'épanouit une riche faune à coquilles et à squelettes calcaires. Ces bancs ont alors une extension horizontale importante.

Cependant les bancs du Grès argileux sont lenticulaires, comme le sont également les grès et les niveaux argileux ou carbonatés du Grès à meules. Les deux termes du Grès à Voltzia ne s'opposent pas par ce trait mais par l'échelle du phénomène. En effet, les dépôts du Grès argileux sont d'immenses feuilles qui s'étendent sur plusieurs centaines de mètres ou plusieurs kilomètres. Dans les deux cas il s'agit de dépôts lenticulaires. Mais dans le premier cas ils naissent dans les chenaux ou dans les flaques d'un paysage discontinu, dans le second cas ils se forment sous une nappe d'eau étendue. Ceci se traduit par un changement d'échelle au niveau des structures sédimentaires.

3. LE PROBLÈME STRATIGRAPHIQUE DE LA LIMITE BUNTSANDSTEIN-MUSCHELKALK

Ces données permettent de reprendre le problème stratigraphique qui avait été laissé ouvert au début de ce mémoire. Il s'agit de la limite entre le Grès à Voltzia et le Muschelsandstein, limite particulièrement intéressante puisque c'est en même temps la limite entre le Buntsandstein et le Muschelkalk.

Les difficultés que soulève cette question ont déjà été discutées (p. 90). Or de nouvelles découvertes paléontologiques ont été faites. De plus, il n'a été tenu compte ici que des gisements fossilifères dont la localisation dans le Grès à Voltzia est bien établie. Enfin, l'analyse sédimentologique permet de décrire l'allure de la transgression du Muschelkalk.

Le passage du Grès à Voltzia au Muschelsandstein s'effectue le plus souvent d'une manière progressive (carrières n° 20, 21, 24, 27, 31, 32 de l'Annexe I). Des grès dolomitiques et des dolomies à faune marine semblable à celle du Muschelkalk se rencontrent à différents niveaux du Grès argileux. Il est fréquent que soit utilisée la notion d'"Argile limite" (WEISS, 1869 b ; THÉOBALD, 1951) pour désigner le sommet du Buntsandstein. Son usage est assez commode sur le terrain car ce banc argileux permet d'indiquer le moment où la précipitation des carbonates devient le mécanisme sédimentaire prépondérant. Mais ce banc ne constitue pas un repère chronostratigraphique car, comme l'a montré VOLLRATH (1924, 1928), les faciès du Trias germanique recoupent obliquement les étages stratigraphiques. Le passage du Grès argileux au Muschelsandstein se produit quand les dépôts carbonatés l'emportent sur les dépôts terrigènes. Dans le Grès argileux, les bancs carbonatés ne représentent que 20 % de l'épaisseur totale des sédiments tandis que dans le Muschelsandstein ils sont dominants et parviennent parfois à constituer la totalité des dépôts. Ce passage correspond également à un changement de la couleur du sédiment. En-dessous, les grès sont colorés en rouge et en gris et les shales sont rouges ou verts. Audessus, dans le Muschelsandstein, dominent les couleurs jaunes et ocres des sédiments carbonatés.

En dernière analyse, la limite entre Grès argileux et Muschelsandstein, qui est aussi la limite entre Buntsandstein et Muschelkalk inférieur, se révèle n'être ni une limite paléontologique ni une limite de faciès. Elle correspond à une réalité simple : le passage d'une sédimentation où alternent les grès, les argiles et les dolomies, mais où dominent les dépôts gréseux, à une sédimentation où les dépôts carbonatés sont prépondérants. Par contre, la limite entre le Grès à meules et le Grès argileux est tranchée. Elle traduit le relais d'un régime deltaïque par une sédimentation marine où les carbonates prennent de plus en plus d'importance (Tableau XVI). Elle marque le début de la transgression mésozoïque dans les Vosges septentrionales.

TABLEAU XVI

Comparaison des caractères du Buntsandstein supérieur et du Muschelkalk inférieur dans le Nord des Vosges : l'histoire d'une transgression. (le signe + exprime la fréquence relative des caractères)

Caractères paléontologiques et sédimentologiques		Indices d'émersion	Indices d'émersion Flore Couleur rouge Grès Dépôts Argileux horize		Stratification en bancs horizontaux	Carbonates	Faune marine			
MUSCHELKALK INFÉRIEUR	MUSCHELKALK INFÉRIEUR Muschelsandstein						+	+	+ + +	• • •
	Grès à Voltzia Bug Cuizia	Grès argileux		+	+	+	+ +	+	+ +	+ +
BUNTSANDSTEIN SUPÉRIEUR		Grès à meules	+	+ +	+ +	+ +	+		+	+
	Cinter	ouches médiaires	+	+	+ +	+ + +				

4. LE PASSAGE DE LA PLAINE DE PIÉMONT AUX PLAGES MARINES

La sédimentation marine du Grès argileux est une étape normale de l'évolution paléogéographique du Buntsandstein supérieur. En effet, lors du dépôt du Grès à meules, la divagation des chenaux sur la zone de piémont avait édifié une vaste plaine côtière. A la fin de cette époque intervint un ralentissement général du mécanisme deltaïque, qui favorisa l'installation d'une abondante végétation. Celle-ci contribua à parfaire la régularisation de la topographie. Les apports détritiques ne compensant plus la subsidence régionale, l'altitude de la plaine se trouva bientôt ramenée à celle de la mer. Alors, progressivement et sans bruit, les eaux marines prirent possession de la région. L'absence de reliefs appréciables leur permit de couvrir d'énormes surfaces malgré la faible épaisseur de la tranche d'eau. Les apports continentaux devenant moins abondants, la sédimentation était essentiellement assurée par le vannage et l'étalement de sédiments antérieurement déposés. Puis, peu à peu, la sédimentation carbonatée prit le relais des dépôts terrigènes.

C – ÉTUDE DES PALÉOCOURANTS

I. MÉTHODES DE MESURE

La géométrie des figures et des structures sédimentaires ainsi que la distribution spatiale des débris organiques sont conditionnées par le jeu des courants. L'étude de leur orientation apporte ainsi d'intéressantes précisions sur la direction et le sens des écoulements.

En vue de reconstituer les trajets des paléocourants dans la région étudiée, plusieurs centaines de mesures ont été effectuées. Elles ont porté sur les éléments suivants :

- la linéation de délit (p. 104) qui traduit l'orientation des grains sous l'action de l'eau.

- les figures sédimentaires dues aux courants (p. 103) : flute-marks, sillons d'érosion, cannelures d'érosion, figures d'impact, cupules en croissant. L'orientation des ripple-marks s'est avérée par trop variable à la surface d'un même banc pour être utilisée dans la reconstitution des pa-léocourants.
- le litage oblique, souvent lié au remplissage des chenaux.
- les amas de végétaux orientés sous l'action d'un courant. Seules les mesures apparemment parallèles à la direction des écoulements ont été prises en considération.
- les chenaux dont l'axe a été déterminé par projection stéréographique (canevas de WULFF).

Pour chaque station et pour chaque type de structure un maximum de mesures a été relevé. Seule la médiane de la distribution graphique de ces mesures a ensuite été retenue et reportée sur un diagramme circulaire.

II. RÉSULTATS

Lors de l'exploitation des résultats, une distinction a été établie entre les structures simples : figures de courant, amas de végétaux et litage oblique, et les chenaux. En effet, ce sont ces derniers qui fournissent les renseignements les plus sûrs sur la direction des paléocourants. Mais leur pente faible, de l'ordre de 1 à 5°, ne permet généralement pas, compte tenu du pendage régional, de déterminer le sens des écoulements. Les mesures des axes de 24 chenaux du Grès à meules font apparaître deux directions privilégiées N 80 et N 120 et une direction mineure N 170 (Fig. 35 B).

Les mesures des structures simples sont plus facilement influencées par les accidents locaux de la topographie. Cependant le regroupement des relevés d'une centaine de stations démontre, là encore, deux directions principales : N 60 et N 120 (Fig. 35 A). C'est la linéation de délit qui donne les résultats les plus homogènes (Fig. 35 D). Le litage oblique et certaines figures sédimentaires (flute-casts par exemple) montrent que les paléocourants se déplaçaient, dans la région étudiée, essentiellement de l'Ouest vers l'Est (Fig. 35 C et 36). La divergence qui s'observe entre la direction des axes des chenaux (N 80, N 120) et celle des autres structures (N 60, N 120) est due au mécanisme même de la sédimentation dans les chenaux. A plusieurs reprises, en effet, un écart atteignant 45° fut observé entre l'axe du chenal et la direction donnée par le litage des grès à plantes constituant son remplisaage. Des observations analogues furent faites par BLUCK et KELLING (1963) dans le Carbonifère du Pays de Galles. Elles seraient à rapporter à l'existence de méandres.



Figure 35 - Orientation des paléocourants dans le Grès à Voltzia



Figure 36 - Directions et sens des écoulements dans le Grès à meules, déduits du litage oblique (r) et des figures de courant (r)

III. CONCLUSION

Les directions des paléocourants relevées dans le Grès à meules indiquent que les écoulements se faisaient statistiquement de l'Ouest vers l'Est, c'est-à-dire du "Continent gaulois" vers la mer germanique. Cette constatation confirme des observations plus anciennes (GRAUVOGEL, 1947 a ; PERRIAUX, 1961 ; PERRIAUX et MÜLLER, 1961). L'étalement des mesures et l'existence de directions de sens opposés traduisent les importantes divagations des chenaux fluviatiles sur la zone de piémont comme on l'observe aujourd'hui sur toutes les grandes plaines deltaïques. Quelques mesures effectuées dans le Grès argileux (Fig. 35 E) montrent que, malgré une dispersion plus accusée, les orientations des courants ne se sont pas fondamentalement modifiées d'une époque à l'autre.

D – LES ARGILES DU GRÈS À VOLTZIA ÉTUDE MINÉRALOGIQUE ET GÉOCHIMIQUE

L'étude minéralogique et géochimique de la fraction inférieure à 2 μ a porté sur 150 échantillons de roches provenant des différents faciès du Grès à Voltzia. La détermination des minéraux argileux a été faite aux rayons X d'après la méthode utilisée à l'Institut de Géologie de Strasbourg (LUCAS, CAMEZ et MILLOT, 1959 ; LUCAS, 1962 ; SITTLER, 1965). Les analyses géochimiques ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre à lecture directe (ATAMAN et BESNUS, 1965 ; ATAMAN, 1966 ; BESNUS et LUCAS, 1970).

I – ÉTUDE DES MINÉRAUX ARGILEUX

DISTRIBUTION DES MINÉRAUX ARGILEUX DANS LES FACIÈS DU GRÈS À VOLTZIA

Dans tous les échantillons étudiés, l'illite est le minéral dominant. La chlorite et la kaolinite sont représentées à parts égales. La montmorillonite est peu abondante.

Le tableau XVII donne les proportions relatives de ces quatre minéraux dans les différents faciès du Grès à meules et du Grès argileux. A titre de comparaison, on y a reporté les valeurs trouvées pour le Muschelsandstein.

Ce tableau suscite les remarques suivantes.

- Il existe une grande homogénéité minéralogique au sein des faciès argileux du Grès à meules, du Grès argileux et du Muschelsandstein. La fraction inférieure à 2 μ est presque exclusivement composée d'illite.
- La parenté est également évidente entre les grès sains et les grès à dalles où la chlorite et la kaolinite sont bien représentées.
- Une certaine ressemblance apparaît entre les grès carbonatés du Grès argileux et ceux du Muschelsandstein.
- De même, dans le Grès à meules, le faciès carbonaté copie le faciès des grès sains.
- Les grès à plantes semblent occuper une place à part. Statistiquement, ils sont plus pauvres en chlorite que les autres faciès gréseux.

2. MANIÈRE D'ÊTRE DES ILLITES

Sur les diagrammes de diffraction des rayons X, l'état de cristallinité des illites se déduit de la largeur, à mi-hauteur, du pic à 10 Å (DUNOYER de SEGONZAC, 1969). On s'aperçoit alors que les illites des grès sains sont mieux cristallisées que celles des faciès argileux. Ce résultat n'est guère surprenant car dans les grès les tailles des illites sont plus élevées, c'est-à-dire plus proches des micas détritiques. Par contre, dans les niveaux argileux, les particules sont plus fines et plus ouvertes. En outre, la recristallisation diagénétique des minéraux argileux se fait généralement mieux dans les grès où la circulation des solutions interstitielles favorise les nourrissages chimiques.

3. INTERPRÉTATION

L'illite consitute à elle seule la quasi totalité de la fraction fine des faciès argileux. Une taille plus faible que celle des autres minéraux a favorisé sa décantation dans les milieux peu agités. Cette illite est mal cristallisée comme les illites ouvertes ou les illites altérées communes. Ceci exclut les phénomènes d'agradation en milieu sursalé ou par diagenèse (LUCAS, 1962).

La chlorite, la kaolinite et, dans une moindre mesure, la montmorillonite sont plus abondantes dans les faciès plus détritiques, grès et grès carbonatés. La chlorite y est vraisemblablement liée aux grosses biotites, tandis que la kaolinite et la montmorillonite le seraient aux feldspaths (MEILHAC et TARDY, 1970). Il est donc probable que tous les minéraux argileux soient détritiques.

Les modestes variations de la composition minéralogique s'expliquent bien. Les roches gréseuses détritiques contenant des minéraux peu altérés issus des roches mères présentent les illites les mieux cristallisées, des chlorites et des traces de montmorillonite. Les faciès argileux sont alimentés par les particules les plus fines que sont les illites ouvertes. Les faciès carbonatés copient les faciès gréseux dans lesquels ils sont interstratifiés. La pauvreté relative en chlorite des grès à plantes est peut-être le résultat du remaniement de sols évoqué par ces dépôts riches en végétaux et n'ayant subi qu'un transport bref. On sait en effet que ce minéral est beaucoup plus vulnérable au cours de la pédogenèse que l'illite (MILLOT, 1964).

Par ailleurs, l'identité de la fraction argileuse des grès à dalles et des grès sains tend à confirmer le fait que les premiers proviennent du remaniement des seconds.

La distinction entre les différents milieux de dépôt établie dans les chapitres précédents, se retrouve donc, dans une certaine mesure, dans la distribution des minéraux argileux.

II – CARACTÈRES GÉOCHIMIQUES DES MINÉRAUX ARGILEUX

Afin de réduire les erreurs de dosage qui peuvent résulter des variations de la composition minéralogique, seuls les échantillons constitués par des illites pures ou presque pures ont été pris en considération. Sur 150 échantillons analysés, 70 ont été retenus. Les autres échantillons formés d'illites moins pures ont cependant confirmé la plupart des résultats obtenus.

1. LES ILLITES DU GRÈS À VOLTZIA

Les analyses chimiques des illites du Grès à Voltzia font apparaître, chez un certain nombre d'échantillons, des teneurs anormalement élevées en quelques éléments (Tableau XVIII). Ceux-ci se trouvent probablement à l'extérieur du réseau cristallin, dans le cas de Fe, Mn et Ti sous forme d'hydroxydes, dans le cas de Ca et Mg à l'état de carbonates.

Après correction des teneurs des éléments majeurs situés à l'extérieur des réseaux, on obtient pour l'ensemble des illites des compositions chimiques sensiblement identiques, exception faite du potassium, quels que soient les faciès et les niveaux stratigraphiques envisagés (Tableau XIX). Elles prouvent la banalité de ces minéraux par rapport à ceux décrits dans d'autres formations géologiques (LARQUÉ, 1969).

TABLEAU XVII

Composition de la fraction argileuse des différents faciès du Grès à Voltzia et du Muschelsandstein (les chiffres sont des moyennes qui correspondent à une estimation semi-quantitative des minéraux, le total étant arbitrairement ramené à 10).

Faciès	Minéraux argileux	Grès à meules		Grès à meules Grès argileux	
		Grès à plantes	Grès sains	Grès à dalles	
Faciès gréseux	Illite Chlorite Kaolinite Montmorillonite	7 1 2 -	6 2 2 ε	6 2 2 ε	
Faciès carbonaté	Illite Chlorite Kaolinite Montmorillonite	ite 6 lorite 2 ιolinite 2 ontmorillonite ε		8 1 1 E	7 1 1 1
Faciès argileux	Illite Chlorite Kaolinite Montmorillonite	9 1 - -		10 ε - -	10 ε - -

TABLEAU XVIII

Analyses chimiques de quelques illites du Grès à Voltzia. (les teneurs sont exprimées en g pour 100 g d'échantillon sec)

Référence de l'échantillon	Localisation	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	${\rm Mn_3O_4}$	TiO_2	Na_2O	$K_{2}O$	Perte à 1000°C	Total
110	Bust (18) Shale vert du Grès à meules	51,5	26,7	2,9	< 0,2	5,8	0,033	0,62	0,19	7,46	6,11	101,26
95	Soultz-les-Bains Shale vert du Grès argileux	51,9	26,1	2,5	0,3	5,6	0,024	0,50	0,10	7,99	6,00	101,09
72	Bust (16) Grès dolomitique du Grès argileux	51,9	15,7	1,5	<u>1,0</u>	<u>16,4</u>	1,383	0,33	0,33	6,16	5,97	100,68
43	Adamswiller (8) Grès à dalles du Grès argileux	48,8	20,9	2,6	0,9	<u>13,4</u>	0,059	<u>1,08</u>	< 0,10	7,35	5,20	100,32

TABLEAU XIX

Position -	Cation	Echantillon n° 110	Echantillon n° 95
Couche tétraédrique	Si Al charge	3,39 0,60 - 0,60	3,44 0,56 - 0,56
Couche octaédrique	Al Fe ^{3*} Mg Ti Mn charge	1,46 0,28 0,28 0,03 0,001 - 0,048	1,48 0,28 0,25 0,02 0,0007 - 0,13
Interfoliaire	Na K charge	0,02 0,62 + 0,65	0,01 0,67 + 0,69

Formules structurales de deux illites du Grès à Voltzia.

2. TENEURS MOYENNES DE QUELQUES ÉLÉMENTS DANS LES DIFFÉRENTS FACIÈS DU GRÈS À VOLTZIA

a) PRÉSENTATION DES ANALYSES CHIMIQUES

Le tableau XX donne les valeurs des médianes de la distribution graphique des mesures pour chaque élément dosé. Les deux bornes extrêmes de l'intervalle de distribution ont également été relevées.

En raison du petit nombre d'échantillons formés d'illites pures et de l'homogénéité des résultats, les grès à plantes, les grès sains et les grès à dalles ont été regroupés au sein d'un unique faciès, le faciès gréseux. De la même manière, les différents niveaux carbonatés ont été réunis dans un faciès carbonaté.

Par contre, la distinction entre Grès à meules et Grès argileux a été maintenue pour le faciès argileux. A titre de comparaison, deux analyses du Muschelsandstein et celle d'un grès psammitique du Grès à meules y ont été ajoutées.

b) RÉSULTATS

En comparant les teneurs des éléments traces et de certains éléments majeurs à travers les différents faciès, on met en évidence, parmi ceux-là, deux types de comportement. Un premier groupe contient des éléments dont les teneurs croissent lorsqu'on passe des faciès les plus détritiques (grès et grès carbonatés) aux faciès argileux : il s'agit essentiellement de Sr, B et Li. Un deuxième ensemble correspond aux éléments dont les teneurs varient dans le sens contraire des précédents : ce sont Fe, Mn et Ti. Ces résultats sont encore plus nets lorsqu'on s'adresse au grès psammitique qui représente l'un des faciès les plus détritiques du Grès à Voltzia. Ils se retrouvent lorsqu'on compare les valeurs des analyses chimiques des grès à celles des faciès argileux du Muschelsandstein.

Les leçons qui se dégagent de ces observations sont les suivantes : <u>plus le milieu de sédi-</u> mentation est détritique, plus il est riche en Fe, Mn et Ti ; inversement, plus il est concentré, plus les teneurs en Sr, B et Li sont élevées.

3. LES VARIATIONS GÉOCHIMIQUES DANS LES FACIÈS ARGILEUX

Une quarantaine d'échantillons provenant des faciès argileux du Grès à Voltzia ont permis d'étudier statistiquement les variations des teneurs des différents éléments.

a) LES VARIATIONS À L'ÉCHELLE DU NIVEAU ARGILEUX

Un niveau argileux du Grès à meules renfermant une riche paléobiocénose à crustacés à été étudié en détail dans un chapitre précédent (p. 124). Il s'agit du niveau argileux n° 1 d'Adams-

TABLEAU XX

Teneurs moyennes et intervalles de distribution de quelques éléments dans les illites du Grès à Voltzia et du Muschelsandstein

Eléments	Muschelsandstein (2 échantillons)	Bancs argileux du Grès argileux (15 échantillons)	Niveaux argileux du Grès à meules (37 échantillons)	Niveaux carbonatés (8 échantillons)	Grès (8 échantillons)	Grès psammitique du Grès à meules
SiO_2	49 (48,5-49,5)	51,25 (49,5-52)	51 (49-59)	51 (49-57,5)	54 (52,50-55,50)	46,4
$A1_2O_3$	24,2 (23,5-25)	25,75 (25-26,7)	25,9 (24,8-28)	23,5 (17,5-25,5)	24 (22,5-25)	28,9
MgO	5,25 (4,30-6,21)	2,82 (2,5-3,20)	2,79 (2,50-5,66)	2,5 (1,6-3,4)	2,4 (2,1-2,8)	3,2
CaO	4,04 (2,2-5,88)	0,39 (0,20-1,66)	0,34 (0,20-0,72)	0,30 (0,11-0,75)	0,40 (0,21-1)	0,7
Fe ₂ O ₃	8,5 (6,5-10,5)	5,9 (4,9-12,5)	5,47 (4,25-12,75)	15,8 (10,8-18,3)	9,6 (4-17,7)	7,1
$\mathrm{Mn}_3\mathrm{O}_4$	0,26 (0,24-0,29)	0,032 (0,024-0,082)	0,032 (0,028-0,29)	0,54 (0,06-3,25)	0,04 (0,02-0,08)	0,077
TiO_2	0,55 (0,49-0,62)	0,58 (0,23-0,78)	0,49 (0,26-0,76)	0,56 (0,36-0,82)	0,79 (0,54-1,16)	1,16
Na_2O	0,23	< 0,10	0,20 (< 0,10-0,43)	0,12 (0,10-0,36)	< 0,10	0,43
K ₂ O	7,64 (7,18-8,10)	7,97 (7,68-9,50)	7,90 (7,36-8,50)	7 (6,70-7,84)	8,25 (7,14-8,70)	9,09
Perte à 1000°C	6	5,95 (5,6-7,7)	5,95 (5,6-6,8)	6,90 (6,50-8)	5,10 (4,60-5,60)	4,78

a) Eléments majeurs en %

b) Eléments traces en p.p.m.

Eléments	Muschelsandstein (2 échantillons)	Bancs argileux du Grès argileux (15 échantillons)	Niveaux argileux du Grès à meules (37 échantillons)	Niveaux carbonatés (8 échantillons)	Grès (8 échantillons)	Grès psammitique du Grès à meules
\mathbf{Sr}	395 (300-490)	415 (225-835)	275 (165-485)	205 (170-330)	235 (142-462)	86
Ba	735 (540-930)	555 (435-875)	600 (430-1100)	750 (420-1900)	700 (440-1340)	971
V	150 (126-174)	185 (130-229)	175 (118-220)	170 (118-428)	145 (116-195)	150
Ni	58 (52-64)	69 (38-118)	66 (40-218)	60 (39-94)	45 (34-88)	50
Co	26 (15-37)	21 (4-35)	30 (4-57)	32 (24-162)	14 (9-89)	47
Cr	116 (111-121)	225 (110-305)	252 (140-419)	190 (132-330)	100 (66-172)	1 37
в	305 (295-315)	360 (255-405)	340 (285=405)	265 (145-335)	215 (195-235)	112
Zn	136 (100-173)	155 (9-210)	141 (45-202)	200 (118-356)	120 (54-226)	211
Ga	36 (35-37)	41 (15-46)	41 (18-59)	37 (27-60)	40 (32-46)	89
Cu	173 (37-309)	42 (12-517)	54 (19-329)	200 (68-652)	100 (34-284)	43
Pb	52 (50-54)	41 (25-60)	47 (20-334)	60 (23-298)	45 (16-117)	20
Li	99 (87-111)	95 (69-158)	96 (70-128)	74 (57-80)	79 (70-85)	
Rb	241 (232-250)	252 (90-338)	158 (36-250)	220 (183-244)	184 (165-191)	

12



Figure 37 - Variations des concentrations des éléments traces et des éléments majeurs, sur une épaisseur de 60 cm, dans le niveau argileux N° 1 d'Adamswiller. Grès à meules.

willer. Il montre une parfaite concordance entre les indications de l'écologie et de la géochimie. En effet, la nappe d'eau lagunaire se restreint et se confine progressivement. L'évaporation l'emporte sur l'approvisionnement. Les eaux se concentrent et la salinité croît. On vérifie que, de la base vers le sommet du profil, c'est-à-dire sur une épaisseur de 60 cm d'argilite verte, les teneurs en bore augmentent. Les fluctuations de détail correspondent aux apports intermittents. D'autres éléments comme Sr, V, Zn, Cu, Pb et Mg varient dans le même sens tandis que les teneurs en Fe et Mn diminuent (Fig. 37). Mais la variation la plus régulière reste celle du bore qui apparaft ainsi comme un bon indicateur de la paléosalinité.

b) LES VARIATIONS À L'ÉCHELLE DU GRÈS À VOLTZIA

En raison du rôle joué par le bore, les différents échantillons des faciès argileux ont été classés d'après les valeurs croissantes de cet élément (Fig. 38). Sur la représentation graphique, on retrouve clairement les deux comportements géochimiques mis en évidence précédemment : lorsque le bore croît, les teneurs en Sr, V, Cr, Zn et K augmentent également tandis que celles en Fe, Mn et Ti décroissent.

c) LE BORE, INDICATEUR DE LA PALÉOSALINITÉ

Le bore est aujourd'hui considéré par de nombreux auteurs comme un indicateur de la paléosalinité, à la suite des précurseurs que furent GOLDSCHMIDT et PETERS (1932) et LANDER-GREN (1945) (nombreuses références in MILLOT, 1964). Cet élément est en effet plus abondant dans la mer que dans les eaux douces. Ses variations quantitatives dans les illites des sédiments sont une fonction croissante de la salinité du milieu de sédimentation.

Les teneurs en bore des faciès argileux du Grès à Voltzia sont très élevées par rapport à celles qu'on trouve habituellement dans le Trias d'Europe (HELING, 1967 ; DAGALLIER, 1968 ; GITTINGER, 1969).

Pour apprécier la signification des teneurs en bore des sédiments argileux du Grès à Voltzia on dispose de deux repères. Le premier est fourni par les niveaux argileux du Muschelsandstein et du Muschelkalk supérieur (calcaires à Cératites) dont le dépôt en milicu marin franc paraît assuré. L'analyse chimique donne une moyenne de 305 ppm de bore. L'autre repère est constitué par un grès psammitique du Grès à meules. Seuls les micas de grande taille ont été analysés. Ces minéraux phylliteux d'origine détritique sont bien plus grands que les illites de la fraction fine. Ils n'ont été que faiblement affectés par l'environnement chimique de leur milieu de dépôt (LANDERGREN, 1958). Leur composition chimique se rapproche ainsi le plus de celle du matériel détritique d'origine, provenant du continent. La teneur en bore de ces micas est de 112 ppm.

100 ppm peuvent donc être considérés comme la teneur d'origine des phyllites détritiques et 300 ppm comme la teneur acquise en milieu marin. Celles des faciès argileux du Grès à Voltzia sont généralement encore plus élevées.

Les niveaux argileux du Grès à meules - Les teneurs en bore sont élevées et dépassent normalement 300 ppm. La médiane de la distribution graphique des mesures varie en fonction des caractères paléontologiques des niveaux argileux (Fig. 39).

- Dans les niveaux argileux à faune aquatique (paléobiocénoses à crustacés et paléobiocénoses à lingules et à lamellibranches), la médiane se situe vers 325 ppm. Les teneurs en bore restent inférieures à 370 ppm.
- Dans les niveaux argileux à organismes uniquement terrestres, la médiane est plus élevée : 345 ppm. Les teneurs en bore peuvent dépasser 400 ppm.

Tout se passe comme si les fortes teneurs en bore traduisaient une salinité trop élevée pour permettre l'épanouissement d'une faune aquatique. En effet, les niveaux argileux où les valeurs en bore dépassent 370 ppm sont systématiquement pauvres en vestiges organiques.

Les niveaux argileux du Grès argileux - Les teneurs en bore sont légèrement plus élevées que dans le Grès à meules. Les valeurs de la médiane et l'étalement des mesures donnent lieu à des constatations analogues.

- Dans les bancs argileux à faune aquatique, la médiane se situe vers 335 ppm
- Dans les bancs argileux dépourvus de faune, la médiane est à 365 ppm et l'intervalle de distribution dépasse 400 ppm.



Figure 38 - Variations de la composition chimique des illites des faciès argileux classés par bore croissant



b) Niveaux argileux à organismes terrestres

Figure 39 - Teneurs en bore de quelques niveaux argileux du Grès à Voltzia

Là encore, les fortes teneurs en bore correspondent à des niveaux sans faune aquatique.

La relation qui existe entre les teneurs en bore des illites et les caractères paléontologiques des niveaux argileux confirme le rôle joué par la salinité en tant que facteur limitant le développement de la faune aquatique. D'après les valeurs relevées dans le Muschelkalk marin, il apparaît que les nappes d'eau du Grès à Voltzia correspondaient fréquemment à un milieu sursalé.

III - CONCLUSION

1/ La distribution des minéraux argileux dans les différents faciès s'explique aisément dans le cadre paléogéographique du Grès à Voltzia. Les illites constituent l'essentiel des niveaux argileux. Elles sont accompagnées par la chlorite et la kaolinite dans les faciès plus détritiques. La chlorite est moins abondante dans les grès à plantes qui ont vraisemblablement remanié d'anciens sols.

2/ L'étude géochimique des illites met en évidence deux catégories d'éléments dont les comportements sont antagonistes :

un premier ensemble comprend B, Sr et Li ; ces éléments sont des indicateurs de la paléosalinité ; leurs teneurs croissent lorsque le milieu se concentre ;

un deuxième ensemble qui groupe Fe, Mn et Ti est un indicateur de continentalité ; les valeurs de ces éléments augmentent lorsque le détritisme du milieu devient plus accentué.

Une concordance remarquable s'observe dans les niveaux argileux entre la succession des faunes aquatiques et la concentration croissante du milieu mise en évidence par la géochimie. Elle montre que l'absence d'organismes est généralement due à une salinité excessive des eaux. Par contre, les grès se sont déposés dans des eaux plus douces, tandis que les faciès carbonatés oc-cupent, à bien des égards, une situation intermédiaire entre ces deux types de milieu.

Ces résultats sont conformes aux caractères des paysages du Grès à Voltzia évoqués dans les chapitres précédents.

TROISIÈME PARTIE

CONCLUSIONS SUR LES PAYSAGES ET LES ÉVOLUTIONS GÉOCHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DU GRÈS À VOLTZIA.

LE MONDE VIVANT À L'ÉPOQUE DU BUNTSANDSTEIN SUPÉRIEUR.

I – LES PAYSAGES ET LA VIE DANS L'ENVIRONNEMENT DELTAÏQUE DU GRÈS À MEULES

1. LA SÉDIMENTATION DELTAÏQUE

Dès la fin de l'ère primaire, l'érosion des reliefs hercyniens d'Europe occidentale contribua à l'accumulation des Nouveaux-grès-rouges. Les matériaux du Buntsandstein des Vosges proviennent d'un "Continent gaulois" dont la localisation à l'W de la chaîne n'est pas encore établie par une opinion unanime. PERRIAUX (1961) le situe à l'W et au SW de Darney (Vosges), tandis que COUREL (1970) estime qu'il occupait l'actuel emplacement du Bassin de Paris. Sur la bordure de ce continent s'édifièrent des aires d'épandage vastes et monotones. Au cours du Trias, cellesci furent progressivement envahies par une mer épicontinentale reliée au domaine des mers alpines par la Trouée de la Haute Silésie (WURSTER, 1968). Par suite de la faible dénivellation topographique naquit alors un paysage amphibie de grande extension horizontale (WURSTER, 1964 ; ORTLAM, 1967 ; BACKHAUS, 1968). Le contact entre la mer et la terre ferme était insaisissable. Un conflit permanent opposait les deux domaines. Les masses d'eau provenant du continent diluaient et repoussaient la nappe d'eau marine. Lorsque les apports détritiques se ralentissaient, la mer gagnait du terrain et empiétait sur le domaine fluviatile. Ce paysage vaste et plat devait être soumis à de violents ouragans et cyclones comparables à ceux qui visitent périodiquement le golfe du Mexique et le golfe du Bengale. De telles catastrophes modifiaient le tracé hydrographique et provoquaient des incursions marines loin à l'intérieur des terres.

Nulle part, la nature actuelle, profondément modelée par l'orogénie alpine et les glaciations quaternaires, n'offre de paysages comparables, tant par leur extension que par leur physiographie, aux grandes aires de sédimentation du Buntsandstein.

A l'époque du Grès à meules, le transport du matériel détritique venant du continent était assuré par un réseau fluviatile dense. Dans le Nord des Vosges, les cours d'eau se dirigeaient vers le NE ou le SE. Une pente faible favorisait le développement de méandres. Les apports consistaient en décharges sableuses successives, étalées dans le temps et dans l'espace. Dans le temps, chaque corps gréseux correspondait en effet à un épisode sédimentaire. Dans l'espace, la divagation des chenaux sur une plaine d'épandage en voie de subsidence assurait la répartition horizontale des sédiments. Partout les taux de sédimentation étaient élevés. Globalement, ce mécanisme sédimentaire se traduisait par un gain du continent sur le domaine marin. C'est la phase constructive de l'évolution deltaïque (SCRUTON, 1960).

Mais la faible pente des lits fut vite compensée par le dépôt de la charge alluviale et les eaux cherchèrent un nouveau chemin pour s'écouler. La partie active du delta se déplace. Alors naissent des bras morts, des étangs et des lagunes. La phase de destruction de l'environnement deltaïque s'amorce. Les influences marines gagnent en importance par l'installation de vasières littorales et, localement, par la précipitation des carbonates. Cette évolution se poursuit jusqu'au moment où, par suite de la subsidence régionale et du tassement des sédiments, un delta actif se construit à nouveau.

2. LES CHENAUX

Un des caractères essentiels du paysage deltaïque du Grès à meules est son instabilité. Le trajet des chenaux changeait au gré des apports. Lors des périodes de crue, leur lit s'encombrait d'un matériel sédimentaire peu évolué, les grès à plantes, dont la granulométrie est plus grossière que celle des autres faciès gréseux. Des galets d'argile, des végétaux arrachés des rives et des cadavres de Vertébrés furent entraînés au cours du transport. L'ensemble de la charge fut ensuite abandonné, brutalement, en vrac. Dans les chenaux plus larges, près des embouchures, ce même matériel était soumis à un triage et à un vannage plus efficaces. La fraction grossière fut éliminée et les éléments argileux dispersés. Ainsi naquit le faciès des grès sains, tandis que la fraction fine était entraînée au large ou piégée dans des cuvettes de décantation.

Le peuplement des berges et des paysages situés à l'amont nous est révélé par les grès à plantes. Les chenaux étaient bordés par une riche végétation d'équisétales (Equisetites, Schizoneura) et de fougères (Anomopteris, Neuropteridium). Des gymnospermes croissaient aux abords (Voltzia, Albertia, Yuccites). Ces végétaux formaicnt davantage des buissons que de véritables arbres. Des amphibiens de grande taille séjournaient à proximité et effectuaient les premiers stades de leur développement dans les eaux douces. Une foule d'organismes terrestres peuplait sans doute ces paysages, mais ils n'ont pas été conservés car ils n'ont guère résisté à un transport prolongé avec un matériel sableux.

3. LE PAYSAGE À FLAQUES ET SON PEUPLEMENT

En dehors du trajet des chenaux, la plaine d'épandage était parsemée d'une multitude de bras morts, d'étangs et de laguncs. Ccux-ci naissaient à la faveur d'une crue, d'un raz de marée ou lors de la migration du réseau fluviatile. Ces étendues d'eau étaient peu profondes et de superficie fort variable. Elles avaient des connexions intermittentes et irrégulières avec les chenaux ou les flaques voisines. Lorsque la nature de l'approvisionnement et la situation géographique s'y prétaient, elles furent colonisées par une faune aquatique eurhyaline. C'est là que s'épanouissaient les paléobiocénoses où les crustacés constituaient l'élément dominant. Ils étaient accompagnés par des méduses, des annélides, des limules, des larves d'insectes, des poissons et, exceptionnellement, par des lingules et des lamellibranches. Les communications avec les eaux marines demeuraient souvent aisées. Elles furent empruntées par divers poissons qui trouvaient dans ces étendues d'eaux calmes une nourriture abondante et un milieu propice à la reproduction. La fréquence de leurs oeufs indique l'existence de véritables fraières. Des insectes venaient également y déposer leurs pontes. Ailleurs, l'isolement des nappes d'eau s'opposait au brassage de la faune aquatique. Il en résulte autant de stations paléobiologiques particulières.

Sur les berges vivaient des scorpions, des araignées, des myriapodes et une foule d'insectes. Amphibiens et Reptiles y faisaient des incursions, imprimant les traces de leurs pas dans la vase molle. Les apports d'eau favorisaient l'installation d'une abondante végétation palustre et sans doute halophile d'équisétales (Equisetites, Schizoneura), de ginkgoales (Baiera) et de gymnospermes (Voltzia, Aethophyllum, Yuccites).

Ces flaques d'eau étaient soumises à une alimentation intermittente par suite des fluctuations des apports d'eau : pluies, crues du réseau fluviatile, marées... Le sédiment argileux qui se déposait enregistrait ces variations sous forme de lamines millimétriques granoclassées. Mais l'évaporation étant supérieure aux arrivées d'eau, le milieu se rétrécit et se confine. Des mortalités massives se produisent alors parmi la faune aquatique sous l'effet de l'appauvrissement des eaux en oxygène et de l'augmentation de la salinité. Finalement les flaques s'assèchent et la végétation prend possession du paysage.

Ailleurs la concentration des eaux était hostile à l'installation d'une faune aquatique diversifiée. L'assèchement croissant entraînait alors localement la précipitation du sel gemme ou des carbonates.

L'existence et l'évolution de ces nappes d'eau met en évidence un autre caractère fondamental de l'environnement deltaïque du Grès à meules, celui de l'extension prise par un système de flaques temporaires dont les eaux se concentraient sous l'effet de l'évaporation. Lors des crues, les chenaux drainaient une partie de ces flaques et leurs eaux s'enrichissaient en sels à leur contact. Une évolution analogue se dessine, à l'heure actuelle, en Egypte où la masse d'eau retenue derrière le barrage d'Assouan, sous l'un des climats les plus chauds du monde, provoque une augmentation de la salinité des eaux du Nil.

Ainsi, pendant le dépôt du Grès à meules, un régime d'eaux saumâtres ou sursalées se généralisait de l'amont vers l'aval de la plaine deltaïque.

4. LES DÉPÔTS LITTORAUX

Les influences marines sont plus manifestes dans les régions de l'environnement deltaïque situées à l'abri des apports détritiques massifs. Une nappe d'eau plus permanente et plus étendue favorisait l'installation d'organismes fouisseurs comme les lingules et les lamellibranches. Ils formaient des peuplements très denses dans un sédiment aux lamines épaisses souvent bioturbées. Quelques crustacés (Isaura, Clytiopsis, Halicyne) recherchaient leur voisinage. Par suite de la migration des faciès au cours du temps, ces vasières littorales se développèrent dans le Nord des Vosges uniquement vers la fin de l'époque du Grès à meules.

De plus, dans des dépressions envahies par la mer, s'effectuait une sédimentation carbonatée. Des organismes marins à tests calcaires y prospéraient : foraminifères, lamellibranches et gastéropodes. Mais fréquemment l'incursion d'un bras du système deltaique interrompait le dépot et remaniait le sédiment sous forme de brèche intraformationnelle.

Les chenaux, les étangs, les lagunes, les vasières littorales et les dépressions à sédimentation carbonatée constituent les différents paysages de l'environnement deltaïque du Grès à meules. Zones de dépôt et zones de remaniement voisinent. L'ampleur des phénomènes de sédimentation est comparable à celle des grandes aires deltaïques actuelles comme celle du Mississippi dont la construction est "l'un des plus grands évènements géologiques de notre temps" (SCRUTON, 1960). Ce parallèle est valable pour la quantité de matériel mis en jeu; mais nous savons qu'au Buntsandstein supérieur les apports détritiques étaient plus grossiers et le climat plus sec que dans le delta du Mississippi.

A la fin de l'époque du Grès à meules survient un ralentissement général du mécanisme deltaïque. Une abondante végétation couvre alors le Nord des Vosges. Mais ce répit est de courte durée. Dès la base du Grès argileux, la mer du Muschelkalk s'avance sur une topographie remarquablement pénéplanée.

II - LA TRANSGRESSION DE LA MER DU MUSCHELKALK

1. LES PLAGES MARINES DU GRÈS ARGILEUX

Le mécanisme deltaïque, poursuivi durant toute l'époque du Grès à meules et complété par une intense pédogenèse vers la fin de son dépôt, a préparé la voie à la transgression marine. Au cours de sa progression sur une surface parfaitement nivelée, la mer annexe les flaques d'eaux saumâtres ou sursalées. Sa salinité subit de ce fait des variations importantes souvent hostiles au développement de la faune aquatique.

Une faible tranche d'eau recouvre d'énormes superficies. Les sédiments précédemment déposés sont partiellement repris. Mais l'énergie du milieu est moindre que dans les chenaux du Grès à meules. Le brassage effectué par les vagues et par les courants conduit à un triage moins efficace du matériel détritique. La proportion des argiles et des carbonates augmente, tandis que la phase sableuse se réduit.

Ce matériel est étalé sur d'immenses plages marines dont COUREL (1970) a cerné les caractères et l'extension sur la bordure orientale du Massif Central. Cette nappe d'eau peu profonde permet localement la sursaturation en chlorure de sodium et la précipitation de sel gemme.

Dans ce paysage, les débris végétaux issus du continent deviennent rares. En revanche, la faune marine se diversifie. Lorsque la sédimentation est carbonatée, s'épanouissent des formes à tests calcaires : foraminifères, lingules, lamellibranches, gastéropodes et échinodermes. Sur les plages sableuses s'installent des lamellibranches fouisseurs, des terriers de Rhizocorallium et des milliers de lingules. Dans les dépôts argileux se retrouvent les paléobiocénoses à lingules et à lamellibranches si fréquentes au sommet du Grès à meules.

Le caractère de la faune du Grès argileux est plus franchement marin que celui du Grès à meules. La plupart des espèces des paléobiocénoses à crustacés ne s'y retrouvent plus. Par contre les mollusques et les échinodermes sont ceux de la mer du Muschelkalk.

2. LE GRÈS COQUILLIER ET LA LIMITE BUNTSANDSTEIN-MUSCHELKALK

Les bancs carbonatés du Grès argileux renferment déjà bon nombre d'espèces de la faune du Muschelkalk inférieur ou Muschelsandstein (Grès coquillier). Il s'agit d'organismes marins dont beaucoup sont sténohalins (par exemple, les échinodermes). Lorsqu'on remonte dans la série stratigraphique, de tels niveaux deviennent de plus en plus fréquents. Le passage du Grès argileux au Muschelsandstein s'effectue d'une manière progressive. Par convention, on situe la base du Muschelkalk au moment où les dépôts carbonatés l'emportent sur les dépôts terrigènes. Au-dessus de cette limite le faciès des grès à dalles disparaft ainsi que la couleur rouge des sédiments. Désormais dominent les grès dolomitiques ou marneux de couleur ocre ou jaunâtre.

En dernière analyse, la limite entre Grès argileux et Muschelsandstein s'avère n'être ni une limite paléontologique ni une limite de faciès. Elle correspond simplement au relais de la sédimentation essentiellement détritique du Grès à Voltzia par des dépôts où la précipitation des carbonates devient le phénomène prépondérant.

Par contre, la limite entre Grès à meules et Grès argileux est tranchée. La flore et la faune euryhaline de l'environnement deltaïque ont presque totalement disparu des plages marines

du Grès à Voltzia supérieur. De plus, à la sédimentation deltaïque succède une sédimentation marine. C'est à la limite entre les deux termes du Grès à Voltzia que débute, dans le Nord des Vosges, la transgression marine du Muschelkalk.

3. LE RELAIS DE LA SÉDIMENTATION DELTAÏQUE PAR LA SÉDIMENTATION MARINE

Dans l'environnement deltaïque du Grès à meules, les dépôts ont un contour lenticulaire. C'est le cas des corps de grès sains, des grès à plantes et des grès carbonatés déposés dans les chenaux, ainsi que des lentilles argileuses formées dans les bras morts et les lagunes. Ce mode de gisement traduit l'instabilité et la diversité des paysages où les sédiments se déposent rapidement dans des zones géographiquement bien localisées.

Une certaine analogie peut être faite avec les faciès du Grès argileux, mais à une toute autre échelle. En effet, les grès à dalles, les bancs argileux ou carbonatés, sont eux aussi lenticulaires. Mais alors que dans le Grès à meules les dépôts sont des corps épais, de 5 à 100 m de largeur, ils forment dans le Grès argileux d'immenses feuilles de plusieurs centaines de mètres ou de plusieurs kilomètres car ils se sont déposés sous une nappe d'eau étendue.

L'apparence des dépôts doit son contraste au changement d'échelle. Dans le premier cas, on parlera de bancs lenticulaires, dans le second de stratifications planes et parallèles. Dans les deux cas, des courants fluviatiles ou marins provoquaient l'accumulation des matériaux détritiques en dispersant les particules fines. Dans les deux cas, il y avait des zones d'ombre où les argiles se décantaient et où les carbonates précipitaient.

Nous saisissons ici à la fois la vérité et l'illusion qui se cachent derrière ces apparences. S'il est vrai que le style a changé, nous restons cependant dans une sédimentation lenticulaire. Ici, comme pour beaucoup de phénomènes naturels, c'est le changement d'échelle qui engendre l'illusion d'un changement de structure.

4. LA PLACE DU GRÈS À VOLTZIA DANS LA STRATIGRAPHIE DU TRIAS

Le Trias du type germanique s'est déposé sur la vaste aire de sédimentation de l'Europe occidentale. Succédant aux faciès détritiques du Buntsandstein, la mer épicontinentale du Muschelkalk, prolongement du géosynclinal alpin, s'y étendit largement. Cette transgression qui se propageait à partir du NE de l'Allemagne, fut progressive. VOLLRATH (1924, 1928) montra que la limite Buntsandstein-Muschelkalk était hétérochrone. Elle était plus ancienne dans le Nord, plus récente dans le Sud. Les faciès recoupent obliquement les étages stratigraphiques.

Dans cette perspective, le Grès à Voltzia inférieur représente la frange deltaIque qui précède la transgression du Muschelkalk et se déplace avec elle. C'est une formation hétérochrone (DURAND et JURAIN, 1969).

La correspondance des différents horizons du Trias de faciès germanique avec les étages du Trias alpin est rendue possible grâce aux migrations de faunes qui se sont produites à de nombreuses reprises entre les deux domaines. Il fut longtemps admis que le Buntsandstein était l'équivalent du Werfénien. Or récemment, DURAND et JURAIN (1969) montrèrent, grâce en particulier à la découverte de Spiriferina fragilis SCHLOT., que la faune du Grès à Voltzia des Vosges méridionales devait être attribuée à l'Anisien inférieur. KREBS (1969), révisant les Reptiles du Buntsandstein, aboutit à une conclusion analogue : l'ensemble de la partie supérieure du Buntsandstein moyen et du Butsandstein supérieur de la rive droite du Rhin serait d'âge Anisien. La présence de Myophoria vulgaris signalée ici à la fois dans le Grès à meules et le Grès argileux du Nord des Vosges, va dans le même sens. En effet, ce lamellibranche n'est connu dans les Alpes qu'à partir de l'Anisien.

La datation stratigraphique des subdivisions du Trias de faciès germanique est délicate. Il s'agit de faciès de transgression. Nombre de réajustements seront encore nécessaires. Il reste, en particulier, à préciser les relations chronologiques entre le Grès à Voltzia et le faciès Röt connu sur la rive droite du Rhin.

Il est cependant nécessaire de noter que le Buntsandstein supérieur des Vosges n'appartient pas au Werfénien mais à l'Anisien. De plus, dans le cadre paléogéographique du Nord des Vosges, l'horizon à racines in situ du sommet du Grès à meules marque la fin du régime deltaïque du Trias inférieur. On touche ici du doigt le début de la transgression du Muschelkalk qui coïhcide avec la base du Grès argileux.

III – LES ÉVOLUTIONS GÉOCHIMIQUES ET BIOLOGIQUES À TRAVERS LE TEMPS ET L'ESPACE

Bien plus que la somme des caractères observés, c'est leur enchaînement, leur succession dans le temps et dans l'espace qui permet de saisir les mécanismes de la sédimentation. L'étude dynamique des faciès est en effet la clé des reconstitutions paléogéographiques.

1. LES VARIATIONS GÉOCHIMIQUES DANS L'ESPACE

Le matériel détritique déposé à l'époque du Grès à Voltzia est originaire du continent. Il en est de même pour les eaux qui ont assuré son transport et pour celles qui cheminent en nappes à travers les sédiments. Ces eaux véhiculent des ions minéraux en provenance des paysages de l'amont. Toute une série de réactions se produisent entre ces solutions en transit et le matériel qu'elles traversent. Certaines d'entre elles ont pu être saisies.

Les solutions sont siliceuses et capables de nourrir les grains de quartz sur leur trajet. Bien plus, les feldspaths eux mêmes, essentiellement potassiques, peuvent s'auréoler et grandir. Ces auréoles de nourrissage sont également potassiques, ce qui indique une fixation précoce du potassium et de la silice avec utilisation sur place de l'aluminium extrait des minéraux en voie d'altération tels que les plagioclases, les biotites et les argiles.

Les ions plus mobiles poursuivent leur chemin vers la mer. Mais un nouveau piégeage est possible. C'est celui du calcium et du magnésium sous forme de carbonates dans des chenaux abandonnés. Là, la concentration des solutions devient suffisante pour que les carbonates précipitent. Parfois même le seuil de saturation du sodium est atteint et le sel gemme se dépose.

Ces niveaux carbonatés du Grès à meules sont généralement lenticulaires et azoiques. Il est donc naturel de penser qu'il s'agit de précipitations chimiques se produisant au niveau des nappes aquifères lorsque celles-ci affleurent dans les points bas de la topographie (BERNARD et SAMAMA, 1968).

Autres sont les dépôts carbonatés du Grès argileux. Là, la précipitation des carbonates s'est effectuée sous une tranche d'eau étendue et permanente où vit une riche faune marine. Le faciès a changé, mais le gradient géochimique est le même. Dans les deux cas, le silicium et le potassium se fixent sur les grains détritiques du piémont, tandis que le calcium et le magnésium et déjà le sodium se déposent plus à l'aval. Dans le Grès à meules, cet aval est représenté par une nappe incluse dans les sédiments, et dans le Grès argileux, par les eaux libres de la mer.

Il est important de souligner la permanence des migrations ioniques issues des continents, malgré la variation des paléogéographies de l'aval.

2. LES VARLATIONS GÉOCHIMIQUES VERTICALES

A l'échelle de la formation du Grès à Voltzia apparaît un premier type de variation. Celuici montre comment, sur une même verticale, en passant du Grès à meules au Muschelsandstein, le piégeage des ions Ca et Mg sous forme de carbonates devient de plus en plus intense. Il traduit la progression de la transgression triasique au cours de laquelle les faciès continentaux reculent devant les dépôts marins.

A l'échelle d'un niveau argileux du Grès à meules, une deuxième variation géochimique a pu être mise en évidence. Le sédiment s'est déposé dans une flaque dont les eaux se concentraient progressivement par suite d'une évaporation supérieure à l'approvisionnement. De la base vers le sommet de l'affleurement, sur une épaisseur de 60 cm, les teneurs en bore des minéraux argileux augmentent statistiquement. Cette variation du bore traduit celle de la salinité des eaux. Le bore apparaît ainsi comme un bon indicateur de la paléosalinité. D'autres éléments, tels Sr, V, Zn, Cu, Pb et Mg, croissent dans le même sens que la concentration du milieu. Par contre les teneurs en Fe et Mn diminuent.

Ce comportement antagoniste de deux catégories d'éléments se retrouve dans les autres faciès argileux du Grès à Voltzia. L'augmentation des teneurs en B, Sr et Li témoigne d'une salinité croissante tandis que celle des teneurs en Fe, Mn et Ti indique un détritisme plus accusé.

<u>Ainsi à l'échelle du niveau épais de quelques décimètres, comme à l'échelle des formations</u> <u>de plusieurs mètres, les mesures géochimiques nous permettent de rendre compte des variations</u> <u>des milieux</u>, en bonne corrélation avec les changements de paysage que nous venons de voir et les variations biologiques qui seront examinées maintenant.

3. LES RELATIONS ENTRE LES VARIATIONS GÉOCHIMIQUES ET LES VARIATIONS BIOLOGIQUES

Dans les étangs saumâtres et les lagunes du Grès à meules, l'assèchement progressif de la nappe d'eau a provoqué des mortalités massives parmi la faune aquatique. Celles-ci sont dues à la diminution de l'oxygène du milieu, comme le suggère la présence de pyrite, mais également à l'augmentation de la salinité. Au cours de la brève histoire d'une telle nappe d'eau, on assiste au remplacement d'une riche paléobiocénose à crustacés par une faune appauvrie composée d'esthéries, de larves d'insectes et de poissons. En même temps la végétation gagne en importance et finit par envahir le milieu lorsque l'assèchement devient total.

Les variations géochimiques des minéraux argileux le long du profil se calquent sur la succession des faunes et des flores. Ceci est particulièrement net pour le bore dont les teneurs augmentent avec la concentration du milieu, c'est-à-dire avec la salinité des eaux. Inversement on a pu vérifier que les niveaux argileux du Grès à meules et du Grès argileux accusant des teneurs élevées en bore étaient justement ceux où la faune aquatique était rare ou absente. La coîncidence entre les variations géochimiques et les variations biologiques des dépôts met en évidence le rôle de la salinité comme facteur limitant l'épanouissement des organismes.

Mais de telles conditions favorisaient du même coup la fossilisation. La matière organique se concentrait dans les flaques résiduelles provenant de l'assèchement des étangs et des lagunes. Sa dégradation se trouvait bloquée dans l'environnement anaérobie et sursalé d'un sédiment argileux peu perméable et déposé rapidement.

Ainsi apparaît une relation entre les propriétés géochimiques du milieu et les conditions d'existence des êtres vivants. De plus, les facteurs responsables des hécatombes des organismes sont aussi ceux qui assurent leur fossilisation. On saisit la raison de l'admirable conservation de vestiges biologiques aussi délicats que les ombrelles des méduses ou les pontes des insectes.

4. LA MISE EN ÉVIDENCE DES SAISONS

Plusieurs méthodes ont permis de mettre en évidence la succession des saisons au sein des lamines des niveaux argileux du Grès à meules et d'apprécier la vitesse à laquelle s'est effectué le dépôt.

Les périodes de floraison des conifères sont caractérisées par l'abondance des pollens et des sporophylles des cônes mâles. Les graines marquent la fin du cycle biologique des plantes et annoncent l'approche de l'automne. La ponte des insectes est également une activité saisonnière. Leur fréquence coîncide avec celle des organes reproducteurs des gymnospermes.

La distribution verticale de ces données biologiques à travers les profils a permis de montrer que des niveaux argileux de quelques décimètres d'épaisseur se sont déposés entre le printemps et l'automne de la même année ou au cours d'un petit nombre d'années. Ces rythmes sont également enregistrés par la géochimie.

De la même façon, la durée du dépôt de deux lamines successives, épaisses de quelques millimètres, a pu être précisée par un raisonnement simple. L'augmentation statistique des tailles individuelles dans deux populations de Palaega pumila provenant de ces lamines correspond à un nombre restreint de mues qui se sont effectuées en l'espace de quelques jours ou de quelques semaines.

Ainsi l'analyse détaillée des caractères paléontologiques du sédiment nous permet à la fois de saisir le rythme des saisons et de nous approcher de la mesure absolue des taux de sédimentation.

5. LE CLIMAT À L'ÉPOQUE DU GRÈS À VOLTZIA

Les résultats de ce travail permettent d'éclairer la question du climat qui régnait à l'époque du dépôt du Grès à Voltzia. Ce problème a déjà été abordé par diverses méthodes.

Une première donnée est fournie par l'étude paléomagnétique des roches qui indique, pour chaque époque géologique, la position des pôles. C'est ainsi qu'on a pu préciser que l'emplacement du pôle Nord se trouvait, au Trias, dans l'Océan Pacifique, près des côtes du Japon (NAIRN, 1960). L'Europe occidentale était donc située entre l'équateur et le tropique du Cancer. Par ailleurs, les paléotempératures calculées à partir du rapport des isotopes 0_{16} et 0_{18} contenus dans les organismes marins, donnent une moyenne de 25°C pour le Norien des Alpes (FABRICIUS et al., 1970). A l'époque du Grès à Voltzia, les températures de la mer devaient être proches de cette valeur. Ceci correspond à des climats chauds.

Le raisonnement géologique a donné lieu à des opinions successives et contradictoires. Au début du siècle, on admettait qu'au Buntsandstein correspondaient des climats désertiques à cause de la couleur rouge des sédiments. Cette même couleur fut invoquée plus tard pour parler de climats tropicaux latéritiques. Une revue de cette question a été faite récemment par MILLOT (1964). On sait aujourd'hui que les couleurs rouges ne sont pas propres aux déserts où elles ne peuvent être héritées que d'autres climats et d'autres lieux. Par ailleurs, il fut démontré que les climats tropicaux humides étaient impossibles puisque, pour l'essentiel, ceux-ci sont caractérisés par la destruction des feldspaths et l'abondance de la kaolinite, ce qui n'est pas le cas des grès du Buntsandstein (MILLOT, PERRIAUX et LUCAS, 1961 ; MILLOT, 1964).

Ces mêmes auteurs ont proposé une nouvelle interprétation : celle d'une altération ménagée qui détruit les plagioclases et les minéraux ferromagnésiens, mais respecte les feldspaths potassiques, sous des climats chauds où alternent des saisons humides et des saisons sèches, sur des reliefs cristallins sollicités par une tectonique vivante. La période humide est nécessaire pour rendre compte de la sédimentation. La saison sèche explique en outre la rubéfaction des produits détritiques antérieurement à leur dépôt. La couleur rouge est donc héritée.

Plus récemment, T.R. WALKER (1967) démontre la genèse du pigment ferrugineux in situ dans les cônes de déjection du désert de Sonoran au Mexique. Le climat y est aride et les minéraux ferromagnésiens sont transportés presque intacts dans les alluvions sableuses. Là, les rares pluies les hydrolysent et libèrent le fer qui pigmente la formation après son dépôt.

La pétrographie des grès du Buntsandstein a révélé une extrême pauvreté en plagioclases et des teneurs en biotites qui atteignent à peine 1 % des éléments figurés. Les minéraux ferromagnésiens, plus vulnérables que les feldspaths calco-sodiques, ont donc été altérés très tôt et il n'est guère possible d'attribuer aux quelques biotites présentes le pouvoir de pigmenter les formations du Buntsandstein.

Les observations sédimentologiques et paléoécologiques faites dans le Grès à Voltzia vérifient les climats chauds et alternants de MILLOT (1964). Des précipitations brèves et brutales provoquaient, durant la saison humide, des effets de "chasse d'eau" qui sont à l'origine des accumulations détritiques lenticulaires dont les grès à plantes sont le meilleur exemple. La concentration et l'assèchement progressifs des flaques du paysage deltafique se produisaient durant la saison sèche. L'existence de celle-ci se déduit également du caractère xéromorphe de la végétation et de l'épaisse gaine de mucilage des pontes d'insectes. Quant à la pigmentation ferrugineuse, il est évident que des migrations et des recristallisations du fer peuvent toujours avoir lieu après le dépôt. Elles sont particulièrement aisées sous l'influence de la matière organique d'origine végétale qui crée localement des conditions réductrices responsables de la décoloration et du panachage qu'on observe aujourd'hui dans nombre de sédiments de couleur rouge.

En conclusion, les faits sédimentologiques et paléoécologiques accumulés dans ce travail confirment l'existence de climats chauds où alternent des périodes humides et des saisons très sèches. Celles-ci provoquent tour à tour les transports, l'alimentation des chenaux et des flaques, l'épanouissement de la vie, puis le confinement des eaux, l'assèchement, les fentes de dessication et la mort.

IV - L'IMAGE DU MONDE VIVANT À L'ÉPOQUE DU BUNTSANDSTEIN SUPÉRIEUR

1. LE TABLEAU PALÉOBIOLOGIQUE

Le Grès à Voltzia a livré une grande diversité d'organismes dont la plupart sont admirablement conservés. Les foraminifères, les méduses, les lingules, les annélides, les lamellibranches, les gastéropodes, les limules, les scorpions, les araignées, les crustacés, les diplopodes, les insectes, les échinodermes, les poissons, les amphibiens et les reptiles forment un tabelau faunistique saisissant. La richesse de la flore ne le cède en rien à celle du monde animal. Les équisétales, les fougères et les gymnospermes sont nombreuses et variées. Mais chaque genre n'est en général représenté que par une seule espèce. Ceci est conforme aux leçons de la biogéographie actuelle qui nous apprend que dans une niche écologique donnée la sélection naturelle exclut normalement la cohabitation de plusieurs espèces d'un même genre (TINTANT, 1966).

Les multiples manifestations de l'activité biologique, pontes, terriers et pistes dont les auteurs sont généralement inconnus, indiquent l'existence d'une faune bien plus variée encore que celle qui se déduit des seuls restes corporels. On aboutit à une conclusion analogue face à la diversité des spores, des pollens et des cônes végétaux, qui contraste avec la relative pauvreté des espèces connues par leurs appareils végétatifs.

La description des organismes du Grès à Voltzia et de leurs traces d'activité enrichit notre vision de la vie du début de l'ère secondaire. Les faunes et les flores des mers alpines étaient déjà bien connues. Ce sont maintenant les peuplements des rivages et des terres émergées qui nous deviennent plus familiers.

2. LES DONNÉES PALÉONTOLOGIQUES NOUVELLES

Jusqu'à présent la faune du Grès à Voltzia était restée en grande partie inédite. Son étude a fait connaître, en particulier parmi les Arthropodes, des types nouveaux d'organisation. Tel est le cas de Euthycarcinus qui réunit à la fois des caractères de crustacé, de mérostome et de diplopode. La double segmentation de son corps est une structure unique chez les crustacés. La sous-classe des Euthycarcinidés a été créée pour ce groupe singulier. Dans une certaine mesure, les affinités systématiques des Halicynés, autre sous-classe nouvelle, demeurent tout aussi énigmatiques. La condensation des segments y est poussée à l'extrême et aboutit à la formation d'un bouclier dorsal insegmenté, recouvrant tout le corps. Des formes nouvelles furent décrites parmi les foraminifères, les méduses, les annélides, les esthéries et les crustacés Isopodes. L'abondance du matériel et son remarquable état de conservation a permis une révision de groupes imparfaitement connus (esthéries, Clytiopsis, Antrimpos) et de proposer, dans plusieurs cas, des reconstitutions détaillées. De plus, l'exploitation systématique des gisements fossilifères fit connaître des formes qui n'avaient pas encore été signalées dans le Grès à Voltzia : les foraminifères, les échinodermes et certains mollusques.

L'étude de cette faune est loin d'être achevée. L'exploitation des gisements fossilifères apporte sans cesse des contributions nouvelles à la connaissance des organismes du Grès à Voltzia. J'espère pouvoir, au long des années, continuer à présenter ces nouveautés et leur enseignement.

3. LES CONDITIONS DE VIE À L'ÉPOQUE DU GRÈS À VOLTZIA

Les associations faunistiques et leur distribution stratigraphique mettent en évidence l'origine marine de la plupart des organismes aquatiques. Dans le Grès à meules s'épanouissaient des formes euryhalines, pauvres en espèces mais riches en individus, car le milieu exerçait une sélection rigoureuse sur le peuplement.

Les variations de la salinité formaient l'obstacle majeur à la colonisation des flaques d'eaux saumâtres ou sursalées. De plus, le climat chaud, à saison sèche prolongée, déterminait, à plus ou moins courte échéance, l'assèchement des étendues d'eau. Les biotopes étaient discontinus et les peuplements temporaires voués à une fin rapide. De telles conditions sont responsables du nanisme de certaines formes.

La turbulence des eaux favorise leur aération. Inversement, les eaux stagnantes s'appauvrissent en oxygène. Ce facteur a également influencé la répartition de la faune aquatique. La pénurie des organismes fouisseurs dans les niveaux argileux à crustacés s'explique par les conditions réductrices qui régnaient dans la vase. L'abondance des lingules et des lamellibranches fouisseurs des vasières littorales du Grès à meules et des plages marines du Grès argileux, implique par contre un milieu mieux aéré. Dans les chenaux, ce sont le haut régime hydrodynamique et le taux élevé de la sédimentation qui s'opposèrent à l'établissement des organismes. Ceux-ci s'implantaient par contre aisément dans les plages sableuses du Grès argileux formées sous des eaux plus calmes. La répartition des terriers de Rhizocorallium est à cet égard significative. Dans le Grès à meules, ils restent localisés dans les flaques où l'agitation était modérée, tandis que dans le Grès argileux ils se trouvent dans tous les faciès.

Les difficultés rencontrées par la faune aquatique du Grès à meules s'estompent dans l'environnement marin du Grès argileux. Les organismes à tests calcaires, foraminifères et mollusques, jouent un rôle croissant et les formes sténohalines comme les échinodermes font leur apparition. Par contre la flore et les organismes terrestres disparaissent. Le relais avec la faune du Muschelkalk est assuré.

4. LA VIE AU TRIAS INFÉRIEUR

La faune du Grès à Voltzia est-elle vraiment représentative de la vie au Trias inférieur ? Ne s'agit-il pas d'un peuplement endémique né de conditions paléogéographiques exceptionnelles ?

L'inventaire paléobiologique des gisements fossilifères d'âge voisin montre, au contraire, que certains organismes décrits dans le Buntsandstein supérieur des Vosges ont une grande répartition géographique. Des niveaux argileux exploités dans le Buntsandstein d'Allemagne ont livré une faune d'Arthropodes et de Vertébrés semblable à celle du Grès à Voltzia quoique moins riche (TRUSHEIM, 1937 ; GEHENN, 1959, 1962 ; MEISCHNER, 1962 ; JÖRG, 1969). Les gisements du Worcestershire (Grande Bretagne) attribués au Keuper par WILLS (1910) sont sans doute contemporains du Grès à Voltzia (WARRINGTON, 1970). Ils renferment une flore et une association faunistique analogues à celles du Grès à meules. Un Euthycarcinidé a été décrit dans le Trias d'Australie, associé à des limules et à divers autres crustacés (RIEK, 1968). Dans le Trias inférieur de l'Utah (U. S. A.) POBORSKI (1954) signale des Halicynés en compagnie d'une faune marine. Cette vaste distribution géographique des formes du Grès à Voltzia s'explique par leur euryhalinité (d'ANCONA, 1932 ; PETIT et SCHACHTER, 1951).

Il n'est pas sans intérêt de souligner que la majorité des groupes zoologiques présents dans les flaques de l'environnement deltaïque ont encore, à l'heure actuelle, des représentants dans les eaux saumâtres. La gamme des organismes euryhalins ne semble guère s'être modifiée depuis le début de l'ère secondaire.

Grâce aux collections réunies par L. GRAUVOGEL, et grâce aux nouvelles pièces que nous accumulons ensemble puisqu'il a bien voulu m'associer à cette entreprise, nous disposons d'un coup d'oeil extraordinaire sur la vie d'une époque située à mi-chemin entre celle du Permien et celle du Jurassique.

Non seulement on parvient à reconstituer avec une grande précision des organismes disparus, mais encore à les faire revivre. On suit, pas à pas, les étapes successives qui mènent de l'oeuf à l'insecte adulte en passant par les stades larvaires. Les études entreprises par Mme L. STAMM-GRAUVOGEL sur la flore du Grès à Voltzia laissent prévoir, là aussi, qu'on pourra saisir l'enchaînement des phases des cycles biologiques depuis les pollens, la graine, la plantule, jusqu'à la plante avec ses organes reproducteurs. Ce n'est pas au spectacle d'un monde figé que nous sommes conviés, mais à l'histoire d'une faune qui naît, s'épanouit, se reproduit et meurt. L'utilisation parallèle de l'analyse fine des sédiments, des indications fournies par les faunes et les flores et des variations géochimiques, aboutit à la reconstitution détaillée des paysages et de la vie dans un vieux piémont hercynien situé, voici 200 millions d'années, à l'emplacement des Vosges. A la suite de PIVETEAU (1951), nous feuilletons quelques unes des plus belles "images des mondes disparus".

FAUNA AND LANDSCAPE OF THE NORTHERN VOSGES IN VOLTZIA SANDSTONE TIMES. A PALEOECOLOGICAL MODEL OF THE UPPER BUNTSANDSTEIN.

SUMMARY

Introduction

The Voltzia Sandstone is a fossiliferous sandstone, and corresponds, west of the Rhine valley, to the Upper Buntsandstein of Germany. It constitutes the passage between terrestrial deposition of the Lower Triassic and marine sedimentation of the Muschelkalk. Paleoecological and sedimentological investigations have led to a better insight into the living world and the genesis of the Upper Buntsandstein of the Northern Vosges, as well as to a better understanding of the Muschelkalk transgression.

FIRST PART

PALEONTOLOGY OF THE VOLTZIA SANDSTONE

1) Fauna (p. 19)

Representatives of the most important animal groups have been found and described : Foraminiferida, Coelenterata (jelly-fishes), Brachiopoda (Lingula), Annelida, Lamellibranchiata, Gastropoda, Merostomata (Limulitella), Arachnida (scorpions, spiders), Crustacea (Branchiopoda, Ostracoda, Malacostraca, Euthycarcinus, Halicyne), Myriapoda, Insecta, Echinodermata, Pisces, Stegocephalia, Reptilia.

2) Evidence of biological activity (p. 65)

Reported are the findings of egg-clusters of insects, Estheria and fishes, coproliths and trace fossils.

3) Flora (p. 75)

The flora consists of Sporae dispersae, Acritarchae, Pteridophytae (ferns, horse-tails), Prespermaphytae, Spermaphytae (Gymnospermae), fructifications, seeds and roots.

The fauna and flora are poor in species but very rich in individuals. Several groups are allready known from the Paleozoic ; other genera are precursors of later developing groups. Many faunal species show dwarfism pointing to highly variable living conditions.

SECOND PART

THE SEDIMENTOLOGY AND PALEOECOLOGY OF THE VOLTZIA SANDSTONE

The Voltzia Sandstone consists of two members : the "Grès à meules" and the covering "Grès argileux". These two levels are different in sedimentological features and in fossil content.

A. THE "GRÈS À MEULES" MEMBER (p. 93)

Four facies could be distinguished.

1) The "Grès sains" (p. 95)

The quarried Voltzia Sandstone has a red or grey colour; it is fine grained and well sorted. Fine (mm scale) parallel lamination is ubiquitous. The "Grès sains" forms lens-shaped beds of 50, 100 or more metres in diameter. At the base solemarks are abundant; the upper surface is covered with ripples. Each sandstone bed corresponds to sand deposition at the mouth of a deltaic channel.

2) The plant-bearing horizons (p. 111)

Grey sandstones with clay galls, amphibian remains and plants occur as channel fills. They represent channel deposits of rivers in spate.

3) The shale horizons (p. 117)

Between the sandstone beds occur lense-shaped green or red shale layers. Finely graded lamination can be accounted for by periodic sediment influx. The shale layers are often fossilbearing. Three faunal assemblages have been distinguished : the crustacean paleobiocenosis, the Lingula and lamellibranches paleobiocenosis and the assemblage with terrestrial organisms. Detailed stratigraphic work on shale lenses with crustacean paleobiocenosis show a gradual impoverishment, from bottom to top, of the aqueous fauna with a simultaneous increase of vegetation. The water expanse eventually dried up. The same development can be gathered from the geochemistry of the clay fraction with an enrichment of certain elements, f.i. boron. Rate of sedimentation can be deduced from the sequential occurrence of organisms. Shale lenses with the crustacean assemblage represent deposition in lagoons, brackish pools or abandoned channels. Shale lenses with the Lingula and lamellibranchs assemblage can be related to deposits formed under tidal-flat conditions. The assemblage with terrestrial organisms would have colonized the salt marshes.

4) Dolomitic sandstones (p. 137)

Dolomitic sandstones are found as channel-fills or intercalated between shale and sand layers. They are often reworked as dolomite breccias and may contain fossils (Foraminiferida, Lamellibranchiata). These carbonate precipitations were formed by evaporation in pools or in the vicinity of the sea.

The landscape in "Grès à meules" times (p. 143)

The "Grès à meules" represents a deltaic deposit with actively meandering channels in a flood plain covered with lagoons, abandoned channels and pools. At the upper boundary of the "Grès à meules" deltaic sedimentation is terminated and a thick cover of vegetation spreads over the entire area.

B. THE "GRÈS ARGILEUX" MEMBER (p. 147)

In the field the boundary between the "Grès à meules" and the "Grès argileux" member is very sharp. In the "Grès argileux" three facies can be recognized.

1) The "Grès à dalles" (p. 149)

It consists of thin sandstone beds of great areal extent. In situ Lingula and Lamellibranchiata and strong bioturbation point to a marine beach environment.

2) The "Bancs argileux" (p. 153)

Shale beds of green or red colour with abundant trace fossils can be referred to tidal flatlike deposition.

3) The dolomitic beds (p. 157)

These are dolomitic sandstones which yield a great amount of marine fossils. The species present are those of the Muschelkalk.

The landscape in "Grès argileux" times (p. 161)

During "Grès argileux" times it is believed that a wide, flat beach region existed, which gradually encroached on the deltaic plain. In the Northern Vosges the transgression of the Muschelkalk is considered to have started here.

C. CURRENT DIRECTIONS (p. 165)

In "Grès à meules" times current directions are from west to east.

D. CLAY MINERALS OF THE VOLTZIA SANDSTONE. MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY (p. 169)

Illite is the main component of the clay fraction. The major and trace elements of the illites of different facies were investigated. From the analyses the significance of B, Sr and Li as indicators of salinity is evident. Contrarily the increase of Fe, Mn and Ti content suggests a correlation with the measure of supply of clastic material. The geochemistry of the clay fraction suggests that a main factor inhibiting the colonization of the water expanses by organismes is a rise in salinity.

THIRD PART

CONCLUSIONS ABOUT THE LANDSCAPE AND THE GEOCHEMICAL AND BIOLOGICAL DEVELOPMENT OF THE VOLTZIA SANDSTONE. LIFE IN UPPER BUNTSANDSTEIN TIMES

1) Landscape and life in the deltaic realm of the "Grès à meules" member (p. 181)

The clastic sediments of the Voltzia sandstone have been supplied from the SW, from the "Gallic Highlands". In "Grès à meules" times a lowlying deltaic plain can be visualized with a network of active channels, separated by shallow lagoons and ephemeral brackish water basins. Flora and fauna are indicative of the different biotopes.

2) The transgression of the Muschelkalk sea (p. 183)

With the "Grès argileux" the deltaic floodplain is once and for all overtaken by the Muschelkalk sea. A shallow water region stretched over hundreds of kilometres. The transition to the Muschelkalk is gradual with increasing carbonate deposition. The Voltzia Sandstone is equivalent with the alpine Anisian stage.

3) Geochemical and biological development in time and space (p. 185)

In the "Grès à meules" the following precipitation order can be seen : Si and K diagenetically enrich the quartz and feldspar of the sandstone facies ; Ca, Mg and even Na precipitate in environments of higher salt concentration (lagoons and pools). In the "Grès argileux" the same order is present. Enrichment of particular trace elements, f.i. boron, corresponds to an increase in salinity that is also reflected in the aqueous fauna. The seasons can be traced and through this the rate of sedimentation. The climate was hot, with heavy downpours and long dry periods.

4) The lifeworld in Upper Buntsandstein times (p. 188)

The fossiliferous beds of the Voltzia Sandstone combine a picture of the aqueous fauna with land inhabitants of the Buntsandstein landscape. On account of the strong evaporation, life conditions must have been hard; this has often led to dwarfism and to hecatombs. The excellent preservation of the fossils and the presence of different stages of development of the same organisms unfold one of the most beautiful pictures of the most beautiful pictures of life in former times.

FAUNA UND LANDSCHAFT DER NORD-VOGESEN ZUR ZEIT DES VOLTZIENSANDSTEINS. ENTWURF EINER PALÄOÖKOLOGIE DES OBEREN BUNTSANDSTEINS.

ZUSAMMENFASSUNG

Einleitung

Der Voltziensandstein entspricht auf linksrheinischer Seite dem obersten Buntsandstein. Er bildet den Übergang von den terrestrischen Ablagerungen der unteren Trias zur marinen Sedimentation des Muschelkalkes. Der Voltziensandsteinist fossilführend. Ziel der paläoökologischen und sedimentologischen Untersuchungen war eine bessere Kenntnis der Fauna und Flora sowie der Genese des Oberen Buntsandsteins der Nord-Vogesen, sowie genauere Einblicke in die Vorgänge bei der Transgression des Muschelkalkmeeres.

ERSTER TEIL DIE PALÄONTOLOGIE DES VOLTZIENSANDSTEINS

1) Die Fauna (S. 19)

Die wichtigsten Tierstämme sind vertreten. Es werden beschrieben : Foraminiferen, Coelenterata (Quallen), Brachiopoden (Lingula), Annelida, Lamellibranchiata, Gastropoda, Merostomata (Limulitella), Arachnida (Skorpione, Spinnen), Crustacea (Branchiopoden, Ostracoden, Euthycarcinus, Malacostraca, Halicyne), Myriapoda, Insekten, Echinodermata, Fische, Stegocephalia, Reptilien.

2) Die Zeugen biologischer Tätigkeit (S. 65)

Es handelt sich um Ei-Ablagen von Insekten, Estherien und Fischen, um Koprolithen und Lebensspuren.

3) Die Flora (S. 75)

Die Flora besteht aus Sporae dispersae, Acritarchen, Pteridophyten (Farne, Schachtelhalme), Prespermaphyten, Spermaphyten (Gymnospermen), Fruchtzpapfen, Samen und Wurzeln.

Die Fauna und Flora sind artenarm, aber individuenreich. Mehrere Gruppen sind schon im Paläozoikum bekannt ; andere Gattungen sind Vorläufer von Formen, die sich erst später stark entwickeln. Viele Tierarten zeigen eine Grössenreduktion, die auf extreme und sehr weckselnde Lebensbedingungen deutet.

ZWEITER TEIL

SEDIMENTOLOGIE UND PALÄOÖKOLOGIE DES VOLTZIENSANDSTEINS.

Der Voltziensandstein besteht aus zwei Niveaus : der Werkstein und die darüberliegende Lettenregion. Beide unterscheiden sich durch ihre sedimentologischen Merkmale und durch den Fossilinhalt.

A. DER WERKSTEIN (S. 93)

Vier Faziestypen konnten hier unterschieden werden :

1) Der Baustein (S. 95)

Der abgebaute Sandstein ist rot oder grau, feinkörnig und gut sortiert. Horizontale Millimeterschichtung herrscht vor. Der Baustein bildet linsenförmige Bänke von 50, 100 und mehr Metern Durchmesser. An deren Basis befinden sich zahlreiche Sohl-Marken und die Dachflächen sind gerippelt. Jede Sandsteinlinse entspricht einer Sandablagerung an der Mündung eines Delta-Armes.

2) Die Pflanzenhorizonte (S. 111)

Graue Sandsteine mit Tongeröllen, Amphibienresten und Pflanzen treten als Rinnen-Ausfüllungen auf. Es sind Hochflut-Ablagerungen des Flussnetzes.

3) Die Tonlagen (S. 117)

Zwischen den Sandsteinbänken befinden sich linsenförmige, grüne oder rote Tonlagen. Gradierte Feinschichtung ist auf periodische Sedimentzufuhr zurückzuführen.

Die Tonlagen sind häufig fossilführend. Drei Lebensgemeinschaften wurden unterschieden: : die Krebs-Lingula und Lamellibranchiata-Paläobiozonose und die terrestrischen Organismen. Feinstratigraphische Profilaufnahmen durch Tonlinsen mit Krebs-Paläobiozonosen zeigen von der Basis bis zum Dach eine allmählich Verarmung der Wasserfauna und eine gleichzeitige Zunahme der Vegetation. Im Laufe der Zeit erfolgte die Trockenlegung der Wasserflächen. Dieselbe Entwicklung lässt sich auch aus der Geochemie der Tonfraktion ablesen, die nach dem Hangenden zu eine Anreicherung an gewissen Elementen, z.B. an Bor, erkennen lässt. Die Sedimentations-Geschwindigkeit kann aus der vertikalen Aufeinanderfolge der Organismen abgeleitet werden. Tonlinsen mit Krebs-Paläobiozonosen entsprechen Ablagerungen in Lagunen, brackigen Tümpeln oder Totarmen.

Tonlinsen mit Lingula- und Lamellibranchiata-Paläobiozönosen sind wattartige Bildungen. Die terrestrischen Organismen besiedelten die Ufer.

4) Die dolomitischen Sandsteine (S. 137)

Dolomitische Sandsteine bilden Rinnen-Ausfüllungen oder Einschaltungen zwischen Tonlagen und Sandsteinen. Sie sind oft als Dolomitbrekzien umgelagert und können Fossilien enthalten (Foraminiferen, Muscheln). Diese Karbonatausscheidungen entstanden durch Verdunstung der Wasserpfützen oder in Meeresnähe.

Die Landschaft zur Zeit des Werksteins (S. 143)

Der Werkstein entspricht einer Deltaablagerung. Zwischen aktiven, hin-und herpendelnden Armen lag eine Ebene, die stellenweise von Lagunen, Totarmen sowie kleineren und grösseren Wasserlachen bedeckt war.

Mit der Oberkante des Werksteins erlahmt die Delta-Sedimentation, und eine dichte Vegetation besiedelt nun das ganze Gebiet.

B. DIE LETTENREGION (S. 147)

Im Gelände ist die Grenze zwischen Werkstein und Lettenregion scharf ausgeprägt. In der Lettenregion sind drei Faziestypen zu unterscheiden.

1) Der Plattensandstein (S. 149)

Er besteht aus dünnen weit verbreiteten Sandsteinbänken. Lingula, Muscheln in situ und eine starke Bioturbation deuten auf eine marine Strandablagerung.

2) Die Tonbänke (S. 153)

Grüne oder rote Tonbänke, die von zahlreichen Lebensspuren durchzogen werden, sind auf wattartige Sedimentation zurückzuführen.

3) Die dolomitischen Bänke (S. 157)

Es handelt sich um dolomitische Sandsteine, die sehr zahlreiche marine Fossilien lieferten. Es sind die gleichen Arten wie im Muschelkalk. Die Landschaft zur Zeit der Lettenregion (S. 161)

Mit der Lettenregion verbindet man die Vorstellung eines breiten und flachen Strandbereiches, der das Deltagebiet allmählich überflutet hat. Hier beginnt in den Nord-Vogesen die Transgression des Muschelkalkes.

C. STRÖMUNGSRICHTUNGEN (S. 165)

Zur Zeit des Werksteins zogen die Strömungen von Westen nach Osten,

D. DIE TONMINERALE DES VOLTZIENSANDSTEINS. MINERALOGIE UND GEOCHEMIE (S. 169)

Illit ist die Hauptkomponente der Tonfraktion. Die Haupt-und Spurenelemente des Illit in den verschiedenen Faziestypen wurden untersucht. Aus den Analysen ergibt sich die Bedeutung von B, Sr und Li als Leitelemente der Salinität. Im Gegensatz dazu ist die Zunahme des Fe-, Mnund Ti-Gehaltes ein Anzeichen von klastischer Materialzufuhr.

Aus der Geochemie der Tonfraktion ist zu schliessen, dass hauptsächlich hoher Salzgehalt der Gewässer, deren Besiedlung durch Organismen stark behinderte.

DRITTER TEIL

SCHLUSSFOLGERUNGEN ÜBER DAS LANDSCHAFTSBILD UND DIE GEOCHEMISCHE UND BIOLOGISCHE ENTWICKLUNG DES VOLTZIENSANDSTEINS. DIE LEBEWELT ZUR ZEIT DES OBEREN BUNTSANDSTEINS.

1) Landschaft und Leben im Deltabereich des Werksteins (S. 181)

Die klastischen Sedimente des Voltziensandsteins sind von SW, vom gallischen Hochlande her, eingeschwemmt worden. Zur Zeit des Werksteins liegt ein flaches Deltagebiet, mit einem Netz aktiver Arme vor, die durch flache Lagunen und vorübergehende Brackwasserbecken voneinander getrennt waren. Flora und Fauna bezeichnen die verschiedenen Biotope.

2) Die Transgression des Muschelkalkmeeres (S. 183)

Mit der Lettenregion wird das Deltagebiet endgültig vom Muschelkalkmeer überflutet. Ein Flachmeer erstreckte sich über Hunderte von Kilometern. Der Übergang zum Muschelkalk vollzieht sich allmählich mit steigender Karbonatausfällung. Stratigraphisch entspricht der Voltziensandstein in der alpinen Trias der Anis-Stufe.

3) Geochemische und biologische Entwicklung in Zeit und Raum (S. 185)

Im Werkstein wird folgende Ausscheidungsfolge nachgewiesen :

Si und K nähren diagenetisch die Quarze und die Kalifeldspäte der Sandsteinfazies; Ca, Mg und sogar Na werden in stärker konzentrierten Milieus ausgefällt (Lagunen und kleinere Gewässer). In der Lettenregion liegt die selbe Ausscheidungsfolge vor. Anreicherungen an gewissen Spurenelementen wie z. B. an Bor entsprechen einer Zunahme der Salinität, die sich auch auf die aquatische Fauna auswirkt. Jahreszeiten können nachgewiesen werden und damit die Sedimentationsgeschwindigkeit. Das Klima war heiss; feuchtere Zeiten mit Niederschlägen wechselten mit langen Trockenperioden ab.

4) Die Lebewelt zur Zeit des Oberen Buntsandsteins (S. 188)

Die Fossil-Lagerstätten des Voltziensandsteins vereinen das Bild der Wasserfauna mit dem der Uferbewohner der Buntsandstein-Landschaft. Durch starke Verdunstung waren die Lebensbedingungen der Organismen hart ; sie führten oft zu Grössenreduktion und Massentod. Die aussergewöhnlich gute und vollständige Erhaltung der Fossilien und die zu beobachtenden verschiedenen Entwicklungsstadien der Organismen ergeben eines der schönsten Lebensbilder der Vorzeit.

BIBLIOGRAPHIE

- ABEL O. (1935) Vorzeitliche Lebensspuren. Jena, G. Fischer Verl., 644 p.
- ADLOFF M.C. et DOUBINGER J. (1969) Etude palynologique dans le Grès à Voltzia (Trias inférieur) - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr., 22, 2, p. 131-148, Strasbourg.
- AGER D.V. (1963) Principles of Paleoecology. An introduction to the study of how and where animals and plants lived in the past - New York, San Francisco, Toronto, London, McGraw-Hill Book Co., 371 p.
- ALBERTI F. von (1834) Beitrag zu einer Monographie des Bunten Sandsteins, Muschelkalks und Keupers und die Verbindung dieser Gebilde zu einer Formation - Stuttgart und Tübingen, Cotta'schen Buchh., 366 p.
- ALBERTI F. von (1864) Ueberblick über die Trias, mit Berücksichtigung ihres Vorkommens in den Alpen Stuttgart, Cotta'schen., Buchh. 353 p.
- ALLEN J.R.L. (1961) Sandstone-plugged pipes in the lower Old Red Sandstone of Shropshire, England - Journ. sedim. Petrology, 31, p. 325-335, Tulsa.
- ALLEN J.R.L. (1963) Henry Clifton Sorby and the sedimentary structures of sands and sandstones in relation to flow conditions - Geol. en Mijnbouw, 42, p. 223-228, Gravenhage.
- ALLEN J.R.L. (1964) Primary current lineation in the lower Old Red Sandstone (Devonian), anglo-welsch Basin - Sedimentology, 3, p. 89-108, Amsterdam.
- ALLEN J.R.L. (1965) A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments -Sedimentology, 5, p. 89-191, Amsterdam.
- ALLEN J.R.L. (1968 a) On criteria for the continuance of flute marks and their implications -Geol. en Mijnbouw n. s. 47, p. 3-16, Gravenhage.
- ALLEN J.R.L. (1968 b) Current ripples. Their relation to patterns of water and sediment motion. Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 433 p.
- ALLEN J.R.L. (1969) Some recent advances in the Physics of sedimentation Proc. geol. Assoc., 80, p. 1-42, London.
- ALTEVOGT G. (1968) Das Problematikum Guilielmites GEINITZ 1858. N. Jb. Geol. u. Paläont. Abh. 132, p. 9-21, Stuttgart.
- ANCONA U. d' (1932) Faune et flore des eaux saumâtres. 2e partie. Comm. Intern. Expl. scient. Médit. Rapp. Pr. Verb. n. s., 7, p. 151-190, Paris.
- ASSMANN P. (1915) Die Brachiopoden und Lamellibranchiaten der oberschlesischen Trias. -Jahrb. Königl. Preuss. geol. L. Anst. Berlin, 36, 1, p. 586-638, Berlin.
- ATAMAN G. (1966) Géochimie des minéraux argileux dans les bassins sédimentaires marins. Etudes sur le bassin triasique du Jura. - Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 25, 237 p., Strasbourg.
- ATAMAN G. et BESNUS Y. (1965) Une méthode de dosage des éléments-traces dans les roches par spectrométrie à lecture directe. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 18, 4, p. 179-189, Strasbourg.
- BACCELLE L. et BOSELLINI A. (1965) Diagrammi per la stima visiva della composizione percentuale nelle rocce sedimentarie. - Ann. Univ. Ferrara n. s., sect. 9, IV, 3, p. 59-62, Ferrara.
- BACKHAUS E. (1968) Fazies, Stratigraphie und Paläogeographie der Solling-Folge (Oberer Buntsandstein) zwischen Odenwald-Rhön und Thüringer Wald. - Oberrhein. geol. Abh. 17, p. 1-164, Karlsruhe.
- BAJARD J. (1966) Figures et structures sédimentaires dans la zone intertidale de la partie orientale de la baie du Mont-Saint-Michel. - Revue Géogr. phys. Géol. dynam. (2), 8, p. 39-111, Paris.
- BALSS H. (1926) Decapoda. in Handbuch der Zoologie fondé par W. Kükenthal, 3, 1, p. 840-1038, Berlin et Leipzig.
- BANDY O.L. (1960) General correlation of Foraminiferal structure with environment. Proc. Int. Geol. Congr. Copenhagen, 22, p. 7-19, Copenhagen.
- BARTHEL K.W. (1964) Zur Entstehung der Solnhofener Plattenkalke (unteres Untertithon). -Mitt. Bayer. Staatssamml. Paläont. hist. Geol. 4, p. 37-69, München.
- BATHER F.A. (1911) Triassic Echinoderms of Bakony. in Result. wissensch. Erf. d. Balatonsees, I, 1, Pal. Anh., 290 p., Wien.
- BAUDET P. (1965) Essai sur le tassement et la stabilité des vases sous l'eau. Etude sédimentologique des figures et structures observées. - Thèse doctorat 3e cycle (Sédimentologie), 71 p., Orsay.
- BENDER G. (1921) Die Homomyen und Pleuromyen des Muschelkalkes der Heidelberger Gegend. -Zeitschr. deutsch. geol. Ges. Abh. 73, p. 24-112, Hannover.
- BENECKE E.W. (1877) Über die Trias in Elsass-Lothringen und Luxembourg. Abh. geol. Specialkarte Els. - Lothr. I, 4, p. 491-831, Strasbourg.
- BENECKE E.W., BÜCKING H., SCHUMACHER E. et VAN WERVEKE L. (1900) Geologischer Führer durch das Elsass. - Berlin, Verl. Borntraeger, 461 p.
- BERNARD A. et SAMAMA J.C. (1968) Première contribution à l'étude sédimentologique et géochimique du Trias ardéchois. - Sci. de la Terre, Mém. 12, 105 p., Nancy.
- BERSIER A. (1953) La sédimentation cyclique des faciès détritiques molasse et houiller, signification et causes, - Revue Inst. Fr. Pétrole, 8, num. spécial, p. 51-56, Paris.
- BERSIER A. (1958) Séquences détritiques et divagations fluviales. Eclog. geol. Helv. 51, p. 854-893, Bâle.
- BERTHOIS L. (1952) Genèse et caractères des galets argileux en Loire. C.R. som. Soc. géol. Fr., p. 264-266, Paris.
- BERTHOIS L. (1958) La formation des estuaires et des deltas. C.R. séances Acad. Sci. 247, p. 947-950, Paris.
- BERTHOIS L. et HOORELBECK J. (1966) La sédimentation dans les cours d'eau et sur les côtes de la Guyane française. C.R. Acad. Sci. 263 D, p. 955-958, Paris.
- BERTRAND H. (1954) Les Insectes aquatiques d'Europe. Encyclopédie entomologique P. Lechevalier, 30 et 31, 556 p. et 547 p., Paris.
- BESNUS Y. et LUCAS J. (1970) Méthode de dosage de 18 éléments majeurs et traces dans les roches sédimentaires et les produits d'altération par spectrométrie à lecture directe. Colloque CNRS n° 923 : Dosage des éléments à l'état de traces dans les roches et les autres substances minérales naturelles (Nancy, 1968), p. 93-106, Paris.
- BEUF S., MONTADERT L. et DEBYSER J. (1962) Sur des structures sédimentaires dénommées "cordons" dans les grès de l'unité IV, Cambro-Ordovicien du Tassili des Ajjers entre l'oued Tassed et Djanet. - C.R. Acad. Sci. 254, p. 892-893, Paris.
- BILL P.C. (1914) Über Crustaceen aus dem Voltziensandstein des Elsasses. Mitt. geol. Landesanst. Els.-Lothr. VIII, 3, p. 289-338, Strasbourg.
- BLEICHER G. (1887) Guide du géologue en Lorraine. Meurthe-et-Moselle, Vosges, Meuse. -Paris, Berger-Levrault et Cie, 210 p.

- BLEICHER M. (1897) Sur la découverte d'une nouvelle espèce de limule dans les marnes irisées de Lorraine. Bull. Soc. Sci. Nancy (2e s.), 14, p. 116-126, Nancy.
- BLUCK B.J. et KELLING G. (1963) Channels from the Upper Carboniferous Coal Measures of south Wales. Sedimentology, 2, p. 29-53, Amsterdam.
- BORNEMANN J.G. (1889) Über den Buntsandstein in Deutschland und seine Bedeutung für die Trias nebst Untersuchungen über Sand- und Sandsteinbildungen im allgemeinen. - Beitr. Geol. Paläont. 1, p. 1-61, Jena.
- BOUMA A.H. (1962) Sedimentology of some flysch deposits. A graphic approach to facies interpretation. - Amsterdam, New York, Elsevier Publ. Co., 168 p.
- BOURCART J. (1944) Stratification ou "litage". C.R. som. Soc. géol. Fr., 5e sér., 14, p. 75-76, Paris.
- BOYD D.W. et ORE H.T. (1963) Patterned cones in Permo-Triassic redbeds of Wyoming and adjacent areas. Journ. sedim. Petrology, 33, p. 438-451, Tulsa.
- BRACONNIER M.A. (1883) Description géologique et agronomique des terrains de Meurthe-et-Moselle, - Nancy, 436 p.
- BRINKMANN R. (1926) Tektonik und Sedimentation im deutschen Triasbecken. Z. deutsch. geol. Ges. 78, p. 52-74, Hannover.
- BROGLIO LORIGA C. (1968) Alcune considerazioni su Lingula tenuissima BRONN del Werfeniano delle Dolomiti. - Ann. Univ. Ferrara, N.S., Sc. Geol. e Paleont. IV, 12, p. 189-202, Ferrara.
- BRONGNIART A. (1828) Essai d'une flore du Grès bigarré. Ann. Sciences nat. 15, p. 435-460, Paris.
- BUBENICEK L. (1964) L'oxydo-réduction en sédimentologie. Bull. Bur. rech. géol. min. 4, p. 1-36, Paris.
- BUFFARD R. (1968) Le Muschelkalk de la région de Villersexel (Haute-Saônc) ct du Massif de la Serre (Jura). - Thèse 3e cycle, Fac. Sci. Dijon, 13, 188 p., Dijon.
- BUSNARDO R. (1969) Découverte de Phyllopodes Conchostracés dans le Trias subbétique (Andalousie, Espagne). - Geobios, 2, p. 89-130, Lyon.
- CAMPBELL C.V. (1967) Lamina, lamina set, bed and bed set. Sedimentology, 8, p. 7-26, Amsterdam.
- CHAMBRE SYNDICALE DE LA RECHERCHE ET DE LA PRODUCTION DU PÉTROLE ET DU GAZ NATUREL (1966) - Essai de nomenclature et caractérisation des principales structures sédimentaires. - Paris, Ed. Technip, 291 p.
- CHAMPEAU A. (1966) Contribution à l'étude écologique de la faune des eaux temporaires de la Haute Camargue. Arch. Oceanogr. Limnol., 14, p. 309-357, Venezia.
- CHOPARD L. (1963) Trichoptères. in Zoologie 2 (Arthropodes). Encyclopédie de la Pléiade, Paris, Gallimard, p. 746-750.
- CLOUD P.E. (1959) Paleoecology-Retrospect and prospect. Journ. Paleont. 33, p. 926-962, Tulsa.
- COLEMAN J.M., GAGLIANO S.M. et WEBB J.E. (1964) Minor sedimentary structures in a prograding distributary. Mar. Geol., 1, p. 240-258, Amsterdam.
- COLEMAN J. M. et GAGLIANO S. M. (1965) Sedimentary structures : Mississippi River deltaic plain. in Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation édité par G. V. Middleton Soc. Econ. Paleont. Mineral. - Spec. Public. 12, p. 133-148, Tulsa.
- CONIL R. et LYS M. (1964) Matériaux pour l'étude micropaléontologique du Dinantien de la Belgique et de la France (Avesnois). Première partie : Algues et Foraminifères. - Mém. Inst. Géol. Univ. Louvain, XXIII, p. 1-295, Louvain.
- CONYBEARE C.E.B. et CROOK K.A.W. (1968) Manual of sedimentary structures. Bur. Min. Res., Geol. Geophys. Bull. 102, 327 p., Canberra.
- CORROY G. (1928) Les Vertébrés du Trias de Lorraine et le Trias lorrain. Ann. Paléont. 17, p. 83-136, Paris.

- COUREL L. (1962) Les faciès à évaporites rapportées au Trias sur la bordure nord-est du Massif Central. - C.R. som. Soc. géol. Fr., p. 20-22, Paris.
- COUREL L. (1970) Trias et Rhétien de la bordure nord et est du Massif Central français. Modalités de la transgression mésozoïque. - Thése Doct. ès Sciences nat., Fac. Sci. Dijon, 358 p. et 248 p., Dijon.
- COUREL L. et DEMATHIEU G.G.P. (1963) Les empreintes de pas fossiles dans le Trias de la bordure est et nord-est du Massif Central. - Bull. scient. Bourgogne, 21, p. 73-91, Dijon.
- COUREL L., DEMATHIEU G. et BUFFARD R. (1968) Empreintes de pas de Vertébrés et stratigraphie du Trias. - Bull. Soc. géol. Fr., 7e sér., 10, p. 275-281, Paris.
- CRAIG G.Y. (1952) A comparative study of the ecology and palaeoecology of Lingula. Trans. Edinburgh geol. Soc. 15, p. 110-120, Edinburgh.
- CRAIG G.Y. (1966) Concepts in Palaeoecology. Earth-Sci. Reviews, 2, p. 127-155, Amsterdam.
- CROWELL J.C. (1955) Directional-current structures from the Prealpine flysch, Switzerland. Geol. Soc. America Bull. 66, p. 1351-1384, New-York.
- DAGALLIER G. (1968) Analyse sédimentologique et géochimique du Trias inférieur de la bordure sous-cévenole entre Joyeuse et les Vans. - Sciences de la Terre, 13, 2, p. 99-157, Nancy.
- DAUBRÉE A. (1852) Description géologique et minéralogique du département du Bas-Rhin. -Paris, Strasbourg, Berger-Levrault, 500 p.
- DEBYSER J. (1955) Etude sédimentologique du système lagunaire d'Abidjan (Côte-d'Ivoire). -Revue Inst. Fr. Pétrole, 10, p. 319-334, Paris.
- DECHASEAUX C. (1951) Contribution à la connaissance des Esthéries fossiles. Ann. Paléont. 37, p. 123-132, Paris.
- DECHASEAUX C. (1953) Classe des Crustacés. Sous-classe des Branchiopodes, in Traité de Paléontologie publié sous la direction de J. Piveteau, III - Paris, Masson et Cie, p. 257-268.
- DEECKE W. (1889) Ueber Fische aus verschiedenen Horizonten der Trias. Palaeontographica, 35, p. 97-138, Stuttgart.
- DEFRETIN S. (1950) Sur quelques Estheria du Trias français à faciès germanique et de l'Hettangien. - Ann. Soc. géol. Nord, 70, p. 214-227, Lille.
- DEFRETIN-LEFRANC S. (1963) Révision des Conchostracés du Trias français à faciès germanique. in Colloque sur le Trias de la France et des régions limitrophes. - Mém. Bur. rech. géol. min. 15, p. 524-535, Paris.
- DELAMARE-DEBOUTTEVILLE C. (1963) Crustacés. in Encyclopédie de la Pléiade, Zoologie, 2, Les Arthropodes. - Paris, Gallimard, p. 259-410.
- DEMANGE J.M. (1963) Myriapodes. in Encyclopédie de la Pléiade, Zoologie, 2, Les Arthropodes. - Paris, Gallimard, p. 411-486.
- DEMATHIEU G. (1966) Rhynchosauroides petri et Sphingopus ferox, nouvelles empreintes de Reptiles des grès triasiques de la bordure Nord-Est du Massif Central. - C.R. Acad. Sci. 263 D, p. 483-486, Paris.
- DEPAPE G. et DOUBINGER J. (1963) Flores triasiques de France. in Colloque sur le Trias de la France et des régions limitrophes. - Mém. Bur. rech. géol. min. 15, p. 507-523, Paris.
- DERRUAU M. (1967) Précis de géomorphologie. 5e édition. Paris, Masson et Cie, 415 p.
- DIENER C. (1920) Brachiopoda triadica in Fossilium Catalogus I, Animalia édité par F. French, pars 10. - Berlin, 109 p.
- DIENER C. (1923) Lamellibranchiata triadica in Fossilium Catalogus I, Animalia édité par C. Diener, pars 19. - Berlin, 259 p.
- DIENER C. (1926) Glossophora triadica in Fossilium Catalogus I, Animalia édité par C. Diener, pars 34. - Berlin, 242 p.

- DUBOIS G. (1948) Subdivisions et nomenclature nouvelles du Trias de la région nord-entre de la France. Livrets Serv. Carte géol. Als. Lorr. Strasbourg, 2, 8 p.
- DUBOUL-RAZAVET C. (1956) Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du delta du Rhône, - Mém. Soc. géol. Fr., N.S., 76, 234 p., Paris.
- DUNOYER DE SEGONZAC G. (1969) Les minéraux argileux dans la diagenèse. Passage au métamorphisme, - Mém, Serv. Carte géol. Als. Lorr. 29, 317 p., Strasbourg.
- DURAND M. et JURAIN G. (1968) Observations lithostratigraphiques sur la région de Plombières. - Bull. Bur. rech. géol. min. 2e s., sect. 1, 2, p. 79-86, Paris.
- DURAND M. et JURAIN G. (1969) Eléments paléontologiques nouveaux du Trias des Vosges méridionales. - C.R. Acad. Sci. 269 D, p. 1047-1049, Paris.
- DUTUIT J.M. (1966) Apport des découvertes de Vertébrés à la stratigraphie du Trias continental du couloir d'Argana (Haut Atlas occidental, Maroc). - Notes Serv. géol. Maroc, 26, 188, p. 29-31, Rabat.
- DUTUIT J. M. (1967) Gisements de Vertébrés triasiques de l'Atlas marocain. in Problèmes actuels de Paléontologie (Evolution des Vertébrés). - Colloque intern. CNRS, 163, p. 427-428, Paris.
- DZULYNSKI S. (1963) Directional structures in flysch. Studia geol. Polonica, 12, p. 1-136, Warszawa.
- DZULYNSKI S., RADOMSKI A. et SLACZKA A. (1956) Sandstone whirl-balls in the silts of the Carpathian flysch. - Ann. Soc. géol. Pologne, 26, p. 107-126, Krakow.
- DZULYNSKI S. et SANDERS J.E. (1962) Current marks on firm mud bottoms. Trans. Connecticut Acad. Arts Sciences, 42, p. 57-96, New Haven.
- DZULYNSKI S. et SLACZKA A. (1958) Directional structures and sedimentation of the Krosno beds (Carpathian flysch). - Ann. Soc. géol. Pologne, 28, p. 205-260, Krakow.
- DZULYNSKI S. et SMITH A.J. (1963) Convolute lamination, its origin, preservation, and directional significance. - Journ. sedim. petrology, 33, p. 616-627, Tulsa.
- DZULYNSKI S. et WALTON E.K. (1963) Experimental production of sole markings. Trans. Edinburgh geol. Soc. 19, p. 279-305, Edinburgh.
- DZULYNSKI S. et WALTON E.K. (1965) Sedimentary features of flysch and greywackes. -Amsterdam, London, New York, Elsevier Publ. Co., 274 p.
- EGERTON M.G. (1854) On a fossil fish from the Upper Beds of the New Red Sandstone at Bromsgrove. - Quart. Journ. geol. Soc. London, 10, p. 367-371, London.
- EHLERS E. (1868) Ueber eine fossile Eunicee aus Solenhofen (Eunicites avitus) nebst Bemerkungen über fossile Würmer überhaupt. - Zeitschr. Wissensch. Zool. 18, n° 3, p. 421-443, Leipzig.
- ÉLIE DE BEAUMONT L. (1828) Observations géologiques sur les différentes formations qui, dans le système des Vosges, séparent la formation houillèrc de celle du Lias. - Paris, Impr. Huzard, 199 p.
- ELLIOTT R.E. (1964) A classification of cross-stratification structures. Nature, 202, p. 451-452, London.
- ELLIOTT R.E. (1965) A classification of subaqueous sedimentary structures based on rheological and kinematical parameters. - Sedimentology, 5, p. 193-209, Amsterdam.
- EMBERGER L. (1968) Les plantes fossiles dans leurs rapports avec les végétaux vivants (Eléments de Paléobotanique et de morphologie comparée). 2e édition. - Paris, Masson et Cie, 758 p.
- ETHERIDGE R. (1880) A contribution to the study of the British Carboniferous Tubicolar Annelida. - Geol. Mag. n. s., Dec. II, 7, p. 109-115; p. 171-174; p. 215-222; p. 258-266; p. 304-307; p. 362-369, London.
- EVANS O.F. (1941) The classification of wave-formed ripple-marks. Journ. sedim. Petrology, 11, p. 37-41, Tulsa.

- FABRICIUS F., FRIEDRICHSEN H. et JACOBSHAGEN V. (1970) Paläotemperaturen und Paläoklima in Obertrias und Lias der Alpen. - Geol. Rundschau, 59, p. 805-826, Stuttgart.
- FAUVEL P. (1959) Classe des Annélides Polychètes in Traité de Zoologie publié sous la direction de P.P. Grassé, V, 1. - Paris, Masson et Cie, p. 13-196.
- FIRTION F. (1934) Description d'une nouvelle espèce de Saurichthys du Grès à Voltzia de Wasselonne. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 2, 2, p. 89-97, Strasbourg.
- FIRTION F. (1936) Note sur quelques gisements fossilifères du Grès à Voltzia d'Alsace. Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 3, p. 13-20, Strasbourg.
- FISK H. N. (1961) Bar-finger sands of Mississippi delta. in Geometry of sandstone bodies édité par J. A. Peterson et J. C. Osmond. - Amer. Assoc. Petrol. Geol. Symposium, p. 29-52, Tulsa.
- FISK H.N., Mc FARLAN E., KOLB C.R. et WILBERT L.J. (1954) Sedimentary framework of the modern Mississippi delta. - Journ. sedim. Petrology, 24, p. 76-99, Tulsa.
- FLICHE P. (1905) Flore fossile du Trias en Lorraine et en Franche-Comté. Bull. Soc. Sciences Nancy, sér. III, 6, p. 1-67, Nancy.
- FLICHE P. (1906) Flore fossile du Trias en Lorraine et en Franche-Comté. Bull. Soc. Sciences Nancy, sér. III, 7, p. 67-166, Nancy.
- FLICHE P. (1908) Flore fossile du Trias en Lorraine et en Franche-Comté. Bull. Soc. Sciences Nancy, sér. III, 9, p. 167-221, Nancy.
- FLICHE P. (1910) Flore fossile du Trias en Lorraine et en Franche-Comté. Bull. Soc. Sciences Nancy, sér. III, 11, p. 222-286, Nancy.
- FOLK R.L. (1951) Stages of textural maturity in sedimentary rocks. Journ. sedim. Petrology, 21, p. 127-130, Tulsa.
- FORCHE F. (1935) Stratigraphie und Paläogeographie des Buntsandsteins im Umkreis der Vogesen. - Mitt. geol. Staatsinst. Hamburg, 15, p. 15-55, Hamburg.
- FÖRSTER R. (1966) Über die Erymiden, eine alte konservative Familie der mesozoischen Dekapoden. - Palaeontographica, 125, Abt. A, p. 61-175, Stuttgart.
- FÖRSTER R. (1967) Die reptanten Dekapoden der Trias. N. Jb. Geol. Palaont. Abh. 128, 2, p. 136-194, Stuttgart.
- FÖRSTNER U., MÜLLER G. et REINECK H.E. (1968) Sedimente und Sedimentgefüge des Rheindeltas im Bodensee. - N. Jb. Miner. Abh. 109, p. 33-62, Stuttgart.
- FRAAS E. (1899) Die Bildung der germanischen Trias, eine petrogenetische Studie. Jahreshefte Ver. vaterl. Naturk. Württemberg, 55, p. 1-66, Stuttgart.
- FRANCIS-BOEUF C. (1947) Recherches sur le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaire. -Ann. Inst. océanogr. 23, p. 149-344, Paris.
- FRANK M. (1928) Zur Stratigraphie und Bildungsgeschichte der Lettenkohle zwischen Südwürttemberg und dem Kettenjura. - Mitt. Min. - Geol. Inst. Techn. Hochschule Stuttgart, 5, p. 456-497, Stuttgart.
- FRANK M. (1929) Über die Verwandtschaftsverhältnisse der germanischen Triasmyophorien. -Centralbl. Min. Geol. Paläont., Abt. B, p. 558-577, Stuttgart.
- FRECH F. (1912) Die Leitfossilien der Werfener Schichten und Nachträge zur Fauna des Muschelkalkes der Cassianer und Raibler Schichten sowie des Rhaet und des Dachsteindolomites (Hauptdolomit). in Result. wissensch. Erf. Balatonsees, I, 1, Pal. Anh. - 95 p., Wien.
- FRENTZEN K. (1920) Die Flora des Buntsandsteins Badens. Mitt. Bad. geol. L. Anst. 8, p. 63-162, Heidelberg.
- FRENTZEN K. (1931) Die Bildungsgeschichte des oberen Buntsandsteins Südwestdeutschlands im Lichte der Palaäontologie. - Zeitschr. deutsch. geol. Ges. 83, p. 517-541, Hannover.
- FREYBERG B. von (1963) Rhizocorallium commune in Schillfazics und das Rhizocorallium-Problem. - Geol. Bl. N-O-Bayern, 13, p. 22-26, Erlangen.
- FÜCHTBAUER H. (1967) Der Einfluss des Ablagerungsmilieus auf die Sandsteindiagenese im mittleren Buntsandstein. - Sedim. Geology, 1, 2, p. 159-179, Amsterdam.

- FUKAI R. et BROQUET D. (1965) Distribution of Chromium in marine organisms. Bull. Inst. océanogr. 65, 1336, p. 1-19, Monaco.
- GADEL F. (1968) Sur un exemple d'évolution lagunaire : l'étang de Saint-Nazaire (Roussillon). -Vie et Milieu, B, 19, p. 291-321, Paris.
- GALL J.C. et FISCHER Y. (1965) Révision du genre Clytiopsis BILL, Décapode du Buntsandstein supérieur. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 18, 1, p. 43-48, Strasbourg.
- GALL J.C. et GRAUVOGEL L. (1964) Un Arthropode peu connu : le genre Euthycarcinus HAND-LIRSCH. - Ann. Paléont. (Invertébrés) 50, 1, p. 1-18, Paris.
- GALL J.C. et GRAUVOGEL L. (1966) Faune du Buntsandstein. I. Pontes d'Invertébrés du Buntsandstein supérieur. - Ann. Paléont. (Invertébrés) 52, p. 155-161, Paris.
- GALL J.C. et GRAUVOGEL L. (1967 a) Faune du Buntsandstein. II. Les Halicynés. Ann. Paléont. (Invertébrés) 53, p. 1-14, Paris.
- GALL J.C. et GRAUVOGEL L. (1967 b) Faune du Buntsandstein. III. Quelques Annélides du Grès à Voltzia des Vosges. - Ann. Paléont. (Invertébrés) 53, fasc. 2, p. 105-110, Paris.
- GALL J.C. et GRAUVOGEL L. (1967 c) A propos d'une végétation fossile conservée in situ dans le Buntsandstein supérieur des Vosges. - C.R. som. séances Soc. géol. Fr., 7, p. 301-303. Paris.
- GALL J.C. et GRAUVOGEL L. (1968 a) Les influences marines dans le Grès à Voltzia (Buntsandstein supérieur) des Vosges du Nord. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 21, 1, p. 53-59, Strasbourg.
- GALL J.C. et GRAUVOGEL L. (1968 b) Présentation d'un profil paléoécologique du Grès à Voltzia (Buntsandstein supérieur) des Vosges. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 21, p. 305-313, Strasbourg.
- GALL J.C. et GRAUVOGEL L. (1971) Faune du Buntsandstein. IV. Palaega pumila sp. nov., un Isopode (Crustacé Eumalacostracé) du Buntsandstein des Vosges (France). - Ann. Paléont. (Invertébrés) 57, 1, p. 77-89, Paris.
- GEHENN R. (1959) Bemerkenswerte und reiche Fisch und Arthropodenfunde im Oberen Buntsandstein Süddeutschlands (rechtsrheinich). - N. Jb. Geol. Paläont. Mh., p. 521-522, Stuttgart.
- GEHENN R. (1962) Feinstratigraphische Untersuchungen im Oberen Buntsandstein der Kraichgau-Umrandung. - Inaug. - Dissert. Univ. Heidelberg, 100 p., Heidelberg.
- GEORGE T.N. (1958) The ecology of fossil animals. I. Organism and environment. Sci. Progress, 46, p. 677-690, London.
- GEORGE T.N. (1959) The ecology of fossil animals. II. Faunal facies. Sci. Progress, 47, p. 86-106, London.
- GIGNOUX M. (1936) Géologie stratigraphique. 2e édition. Paris, Masson et Cie, 709 p.
- GILBERT G.K. (1914) The transportation of debris by running water. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 86, 263 p., Washington.
- GILLET S. et ACHARD G. (1947) Le problème de l'euryhalinité : quelques études sur les faunes des limans. - La Revue scient., 3278, p. 785-805, Paris.
- GITTINGER K. (1969) Geochemische Faziesuntersuchungen im oberen Hauptmuschelkalk und unteren Keuper Luxemburgs. - Publ. Serv. géol. Luxembourg, 19, 109 p., Luxembourg.
- GLAESSNER M.F.(1969 a) Decapoda. in Treatise on Invertebrate Paleontology publié sous la direction de R.C. Moore, Part R, Arthropoda 4, 2, p. 399-533, Boulder.
- GLAESSNER M.F. (1969 b) Cycloidea. in Treatise on Invertebrate Paleontology publié sous la direction de R.C. Moore, Part R, Arthropoda 4, 2, p. 567-570, Boulder.
- GLANGEAUD L. (1938 a) Transport et sédimentation dans l'estuaire et à l'embouchure de la Gironde. Caractères pétrographiques des formations fluviatiles, saumâtres, littorales et néritiques. - Bull. Soc. géol. Fr. (5), 8, p. 599-630, Paris.
- GLANGEAUD L. (1938 b) Etudes quantitatives et expérimentales sur l'érosion et le transport par les eaux courantes. - Rev. Géogr. phys. et Géol. dyn. 11, p. 323-370, Paris.

- GLANGEAUD L. (1939) Rôle de la suspension tourbillonnaire et du roulement sur le fond dans la formation des sédiments actuels de l'estuaire girondin entre Bordeaux et la Pointe de Grave. - C.R. Acad. Sci. 208, p. 1595-1597, Paris.
- GLANGEAUD L. (1941) Corrélation statistique, classification et hiérarchie des facteurs intervenant dans la formation des sédiments. - Bull. Soc. géol. Fr. (5), 11, p. 371-388, Paris.
- GOLDSCHMIDT V.M. et PETERS C. (1932) Zur Geochemie der Bors. Nachr. Ges. u. Wiss. Göttingen Math. Phys. Kl. 3, p. 402-407 ; 4, p. 528-545, Göttingen.
- GRABAU A.W. (1904) On the classification of sedimentary rocks. The Amer. Geol. 33, p. 228-247, Minneapolis.
- GRAUVOGEL L. (1947 a) Contribution à l'étude du Grès à Voltzia. C.R. som. Soc. géol. Fr., p. 35-37, Paris.
- GRAUVOGEL L. (1947 b) Note préliminaire sur la flore du Grès à Voltzia. C.R. som. Soc. géol. Fr., p. 64-66, Paris.
- GRAUVOGEL L. (1947 c) Note préliminaire sur la faune du Grès à Voltzia. C.R. som. Soc. géol. Fr., p. 90-92, Paris.
- GRAUVOGEL L. (1947 d) Sur quelques types de pontes du Grès à Voltzia (Trias inférieur) des Vosges. C.R. Acad. Sci. 225, p. 1165-1167, Paris.
- GRAUVOGEL L. (1951 a) Découverte de méduses dans le Grès à Voltzia (Trias inférieur) des Vosges. - C.R. som. Sco. géol. Fr., p. 139-141, Paris.
- GRAUVOGEL L. (1951 b) Sur des pontes de Poissons du Grès à Voltzia (Trias inférieur) des Vosges. C.R. som. Soc. géol. Fr., p. 152-154, Paris.
- GRAUVOGEL L. (1951 c) Sur un horizon à galets de dolomie fossilifère dans le Grès à Voltzia (Trias inférieur) des Vosges. - C.R. Acad. Sci., 232, p. 2033-2034, Paris.
- GRAUVOGEL L., DOUBINGER J. et GRAUVOGEL L. (1967) Contribution à l'étude des conifères du Trias inférieur (Grès à Voltzia) : "Le cône mâle de Voltzia sp.". - C.R. Acad. Sci. 264 D, p. 567-570, Paris.
- GRAUVOGEL L. et GALL J.C. (1962) Progonionemus vogesiacus nov. gen., nov. sp., une méduse du Grès à Voltzia des Vosges septentrionales. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 15, 2, p. 17-27, Strasbourg.
- GRAUVOGEL L. et LAURENTIAUX D. (1952) Un Protodonate du Trias des Vosges. Ann. Paléont., 38, p. 121-129, Paris.
- GRAUVOGEL-STAMM L. (1969 a) Nouveaux types d'organes reproducteurs mâles de conifères du Grès à Voltzia (Trias inférieur) des Vosges. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 22, 2, p. 93-120, Strasbourg.
- GRAUVOGEL-STAMM L. (1969 b) Complément à la note : Nouveaux types d'organes reproducteurs mâles de conifères du Grès à Voltzia (Trias inférieur) des Vosges (Grauvogel-Stamm, 1969 a). Désignation des holotypes et des paratypes. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 22, 4, p. 355-357, Strasbourg.
- GREBE H., WEISS E. et VAN WERVEKE L. (1892) Erläuterungen zu Blatt Saarbrücken. Geologische Specialkarte von Elsass-Lothringen. 62 p., Strasbourg.
- GROZDILOVA L.P. et GLEBOVSKAIA E.M. (1948) Matériaux pour l'étude de Glomospira et autres représentants des Ammodiscidae dans le Viséen de Makharov, Krasnokama, Gjel et régions moscoviennes. - Trav. Inst. Sc. Géol. Ac. Sc. URSS, 62, ser. Géol., 19, p. p. 145-149, Moscou.
- GUNTER G. (1947) Paleoecological import of certain relationsships of marine animals to salinity. - Journ. Paleont. 21, p. 77-79, Tulsa.
- HALLAM A. (1965) Environmental causes of stunting in living and fossil marine benthonic Invertebrates. - Palaeontology, 8, p. 132-155, London.
- HAMBLIN W.K. (1961) Micro-cross-lamination in Upper Keweenawan sediments of northern Michigan. - Journ. sedim. Petrology, 31, p. 390-401, Tulsa.
- HANDLIRSCH A.((1914) Eine interessante Crustaceenform aus der Trias der Vogesen. -Verhandl. K.K. zool.-bot. Ges. 64, p. 1-8, Wien.

- HÄNTZSCHEL W. (1936) Die Schichtungs-Formen rezenter Flachmeer-Ablagerungen im Jade-Gebiet. - Senckenbergiana, 18, p. 316-356, Frankfurt a. M.
- HÄNTZSCHEL W. (1955) Lebensspuren als Kennzeichen des Sedimentationsraumes. Geol. Rundschau, 43, p. 551-561, Stuttgart.
- HÄNTZSCHEL W. (1962) Trace fossils and Problematica. *in* Treatise on Invertebrate Paleontology publié sous la direction de R.C. Moore, Part W, Miscellanea, p. 177-245, Boulder.
- HÄNTZSCHEL W. (1965) Vestigia Invertebratorum et Problematica. in Fossilium Catalogus I Animalia édité par E. Westphal, pars 108, 142 p., Gravenhage.
- HARMS J.C. et FAHNESTOCK R.K. (1965) Stratification, bed forms, and flow phenomena (with an example from the Rio Grande). in Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation édité par G.V. Middleton. - Soc. Econ. Paleont. and Min. Spec. Public. 12, p. 84-115, Tulsa.
- HARMS J.C., Mc KENZIE D.B. et Mc CUBBIN D.G. (1963) Stratification in modern sands of the Red River, Louisiana. - Journ, Geology, 71, p. 566-580, Chicago.
- HAUBOLD H. (1966 a) Therapsiden und Rhynchocephalen-Fährten aus dem Buntsandstein Südthüringens. - Hercynia, N.F., 3, p. 147-183, Halle.
- HAUBOLD H. (1966 b) Eine Pseudosuchier-Fährtenfauna aus dem Buntsandstein Südthüringens. -Hall. Jb. Mitteldt. Erdg. 8, p. 12-48, Halle.
- HECKER R.F. (1957) Bases de la Paléoécologie. Traduit par J. Roger en 1960. Bur. Rech. géol. min., Ann. Serv. Inf. géol. 44, 98 p., Paris.
- HEDGPETH J.W.(1957) Treatise on marine ecology and paleoecology. v. 1 : Ecology. Geol. Soc. America, Mem. 67, 1296 p., New York.
- HELING D. (1967) Die Salinitätsfazies von Keupersedimenten aufgrund von Borgehaltsbestimmungen. - Sedimentology, 8, p. 63-72, Amsterdam.
- HESS H. (1965) Trias-Ophiuren aus Deutschland, England, Italien und Spanien. Mitt. Bayer. Staatssamml. Paläont. hist. Geol. 5, p. 151-177, München.
- HESSE E. (1900) Die Mikrostructur der fossilen Echinoideenstacheln und deren systematische Bedeutung. - N. Jb. Min. Geol. Pal., Beil. Bd. 13, p. 185-264, Stuttgart.
- HESSLER R.R. (1969) Peracarida. in Treatise on Invertebrate Paleontology publié sous la direction de R.C. Moore, Part R, Arthropoda 4, 1, p. 360-393, Boulder.
- HEYLER D. (1969) Un nouveau Stégocéphale du Trias inférieur des Vosges: Stenotosaurus lehmani. - Ann. Paléont. (Vertébrés), 55, 1, p. 71-80, Paris.
- HOGARD H. (1837) Description minéralogique et géologique des régions granitique et arénacée du système des Vosges, avec un atlas comprenant une carte géognostique des Vosges, plussieurs vues et coupes. - Epinal, 423 p.
- ILLING L.V., WELLS A.J. et TAYLOR J.C.M. (1965) Penecontemporary dolomite in the Persian Gulf. in Dolomitization and Limestone Diagenesis édité par L.C. Pray et R.C. Murray. - Soc. Econ. Pal. Miner. Spec. Publ. 13, p. 89-111, Tulsa.
- IMBRIE J. et NEWELL N. (1964) Approaches to Paleoecology. New York, London, Sydney, J. Wiley and Sons Inc., 432 p.
- JANICKE V. (1969) Untersuchungen über den Biotop der Solnhofener Plattenkalke. Mitt. Bayer. Staatssamml. Palaont. hist. Geol. 9, p. 117-181, München.
- JOHNSON R.G. (1960) Models and methods for analysis of the mode of formation of fossil assemblages. - Geol. Soc. Amer. Bull. 71, p. 1075-1085, New York.
- JOHNSTON W.A. (1921) Sedimentation of the Fraser River delta. Geol. Survey Canada, Mem. 125, 46 p., Ottawa.
- JOHNSTON W.A. (1922) The character of the stratification of the sediments in the recent delta of the Fraser River, British Columbia, Canada. - Journ. Geology, 30, p. 115-129, Chicago.
- JONES T.R. (1862) A monograph of the fossil Estheriae. Palaeont. Soc. 14, p. 1-134, London.
- JÖRG E. (1969) Eine Fischfauna aus dem Oberen Buntsandstein (Unter-Trias) von Karlsruhe-Durlach (Nordbaden). - Beitr. naturk. Forsch. Südw. Deutsch. 28, 2, p. 87-102, Karlsruhe.

- JUNG J. (1958) Précis de Pétrographie, Roches sédimentaires, métamorphiques et éruptives. - Paris, Masson et Cie, 314 p.
- JUNG J. et BROUSSE R. (1959) Classification modale des roches éruptives utilisant les données fournies par le compteur de points. - Paris, Masson et Cie, 122 p.
- KIRCHNER H. (1923) Limulus sandbergeri n. sp. aus dem fränkischen oberen Buntsandstein (Plattensandstein). - Centralbl. Min. Geol. Pal. 20, p. 634-639, Stuttgart.
- KNOCHE H. et OURISSON G. (1967) Organische Verbindungen in fossilen Pflanzen (Schachtelhalm).
 Angew. Chemie, 79 Jg, 24, p. 1107-1108, Weinheim.
- KNÜPFER J. et KOZUR H. (1968) Eine neue Ostracoden-gattung aus der Trias des germanischen Binnenbeckens. - Mber. Deutsch. Akad. Wiss. Berlin, 10, 4-5, p. 322-331, Berlin.
- KOBAYASHI T. (1954) Fossil Estherians and allied fossils. Journ. Fac. Sci. Univ. Tokyo, sect. II, 9, 1, p. 1-192, Tokyo.
- KOEHN-ZANINETTI L. (1969) Les Foraminifères du Trias de la région de l'Almtal (Haute-Autriche). - Jb. Geol. Bund. Anst., Sonderb. 14, p. 1-155, Wien.
- KOEHN-ZANINETTI L., BRÖNNIMANN P. et GALL J.C. (1969) Description de quelques Foraminifères du Grès à Voltzia (Buntsandstein supérieur) des Vosges (France). - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 22, 2, p. 121-130, Strasbourg.
- KOKEN E. (1898) Beiträge zur Kenntnis der Gastropoden des süddeutschen Muschelkalkes. -Abh. geol. Specialkarte Els. - Lothr., N.F., 2, 49 p., Strasbourg.
- KOLB C.R. et VAN LOPIK J.R. (1966) Depositional environments of the Mississippi River deltaic plain - Southeastern Louisiana. in Deltas in their geologic framework édité par M.L. Shirley, p. 17-61, Houston.
- KOZUR H. (1968) Neue Ostracoden aus dem Röt und Muschelkalk des germanischen Binnenbeckens.
 Mber. deutsch. Akad. Wiss. Berlin, 10, 7, p. 498-519, Berlin.
- KOZUR H. (1970) Neue Ostracoden-Arten aus dem obsersten Anis, des Bakonyhochlandes (Ungarn). - Ber. Nat. - Med. Ver. Innsbruck, 58, p. 1-40, Innsbruck.
- KREBS B. (1969) Ctenosauriscus koeneni (V. HUENE), die Pseudosuchia und die Buntsandstein-Reptilien. - Eclogae geol. Helv. 62, 2, p. 697-714, Bâle.
- KREJCI-GRAF K. (1932) Definition der Begriffe Marken, Spuren, Fährten, Bauten, Hieroglyphen und Fucoiden. - Senckenbergiana, 14, p. 19-39, Frankfurt a.M.
- KRISTAN-TOLLMANN E. et TOLLMANN A. (1964) Das mittelostalpine Rhät-Standartprofil aus dem Stangalm-Mesozoikum (Kärnten). - Mitt. Geol. Ges. 56, p. 539-589, Wien.
- KRUIT C. (1955) Sediments of the Rhone delta. I. Grain size and microfauna. Verhand. K. Nederl. Geol. Mijnbouw. Gen. Geol. ser. 15, p. 357-556, Gravenhage.
- KUENEN P.H. (1950) Marine geology. New York, J. Wiley and Sons Inc., 568 p.
- KUENEN P.H. (1953) Significant features of graded bedding. Bull. amer. Assoc. Petrol. Geol. 37, p. 1044-1066, Tulsa.
- KUENEN P.H. (1957) Sole markings of graded graywacke beds. Journ. of Geology, 65, p. 231-258, Chicago.
- KUENEN P.H. (1958) Experiments in geology. Trans. geol. Soc. Glasgow, 23, p. 1-28, Glasgow.
- KUHN O. (1961) Die Tier- und Pflanzenwelt des Solnhofener Schiefers. Mit vollständigem Artenund Schriftenverzeichnis. - Geol. Bavarica, 48, p. 1-68, München.
- KUHN-SCHNYDER E. (1963) I Sauri del Monte San Giorgio. Arch. Storico Ticinese, 16, p. 811-854, Bellinzona.
- KÜHN-VELTEN H. (1955) Subaquatische Rutschungen im höheren Oberdevon des Sauerlandes. -Geol. Rundschau, 44, p. 3-25, Stuttgart.
- KUTASSY A. (1931) Lamellibranchiata triadica II. in Fossilium Catalogus I Animalia édité par
 W. Quenstedt, pars 51, p. 261-477, Berlin.
- KUTSCHER F. (1940) Ophiuren-Vorkommen im Muschelkalk Deutschlands. Zeitschr. deutsch. geol. Ges. 92, p. 1-18, Hannover.
 208

- LADD H.S. (1957) Treatise on marine ecology and paleoecology. v. 2 : Paleoecology. Geol. Soc. America, Mem. 67, 1077 p., New York.
- LADURON D. (1966) Sur les procédés de coloration sélective des feldspaths en lame mince. -Ann. Soc. géol. Belgique, 89, 8, p. 281-294, Liège.
- LANDERGREN S. (1945) Contribution to the geochemistry of boron. Arkiv Kemi. Min. Geol. 19 A, 25, p. 1-7; 26, p. 1-31, Stockholm.
- LANDERGREN S. (1958) Distribution of boron in different size classes in marine clay sediments. - Geol. Fören. Stockholm Förhandl. 80, p. 104-107, Stockholm.
- LANTEAUME M., BEAUDOIN B. et CAMPREDON R. (1967) Figures sédimentaires du flysch "Grès d'Annot" du synclinal de Peira-Cava. - Paris, éditions CNRS, 93 p.
- LAPPARENT A. de (1883) Traité de Géologie. 1ère édition. Paris, Savy.
- LAPPARENT A. de (1900) Traité de Géologie. 4è édition. Paris, Masson et Cie.
- LARQUÉ P. (1969) Compilations d'analyses chimiques. I. Le groupe de l'illite. Note interne : Centre Sédim. Géochimie Surface du CNRS, 26 p., Strasbourg.
- LAURENTIAUX D. (1953) Classe des Insectes. in Traité de Paléontologie publié sous la direction de J. Piveteau, III, p. 397-527, Masson et Cie, Paris.
- LAURENTIAUX-VIEIRA F. et LAURENTIAUX D. (1963) Réflexions sur la Paléontologie du Trias français et sa signification. *in* Colloque sur le Trias de la France et des régions limitrophes. - Mém. Bur. rech. géol. min. 15, p. 501-506, Paris.
- LEGRAND J.J. (1952) Contribution à l'étude expérimentale et statistique de la biologie d'Anilocra physodes L. (Crustacé Isopode Cymothofdé). - Arch. Zool. expér. gén. 89, p. 1-55, Paris.
- LEHMAN J.P. (1966 a) Actinoptérygiens, Crossoptérygiens, Dipneustes. in Traité de Paléontologie publié sous la direction de J. Piveteau, IV, 3, Masson et Cie, p. 1-412, Paris.
- LEHMAN J.P. (1966 b) La Paléoécologie. Mises à jour scient. 1, p. 369-385, Paris.
- LEONARDI P. (1935) Il Trias inferiore delle Venezie. Mem. Inst. Geol. Univ. Padova, 11, 136 p., Padova.
- LEONARDI P. (1967) Le Dolomiti. Geologica dei monti tra Isarco e Piave. vol. I, 552 p., Trento.
- LESSERTISSEUR J. (1955) Traces fossiles d'activité animale et leur signification paléobiologique. - Mém. Soc. géol. Fr., n.s., 74, 150 p., Paris.
- LIÉTARD M.A. (1888) Note sur le Trias dans la région méridionale des Vosges. Bull. Soc. Sciences Nancy, p. 44-68, Nancy.
- LILLE R. et SCOLARI G. (1968) Phénomènes de diagenèse précoce dans les sédiments terrigènes des bordures triasiques maconnaise et sous-cévenole. - Bull. Bur. rech. géol. min. 2e s., sect. IV, 4, p. 67-88, Paris.
- LINCK O. (1942) Die Spur Isopodichnus Senckenbergiana, 25, p. 232-255, Frankfurt a. M.
- LINCK O. (1943) Die Buntsandstein-Kleinfährten von Nagold. (Limuludichnulus nagoldensis n.g. n. sp., Merostomichnites triassicus n. sp.). - N. Jb. Min. Geol. Palaont. Mh. Abt. B, 9-27, Stuttgart.
- LINCK O. (1948) Lebens-Spuren aus dem Schilfsandstein (Mittl. Keuper km 2) NW-Württembergs und ihre Bedeutung für die Bildungsgeschichte der Stufe. - Jahresh. Ver. vaterl. Naturkd. Württemberg, 97-101, p. 1-100, Stuttgart.
- LINCK O. (1956) Drift-Marken von Schachtelhalm-Gewächsen aus dem Mittleren Keuper (Trias). - Senckenbergiana, 37, p. 39-51, Frankfurt a.M.
- LINCK O. (1961) Lebens-Spuren niederer Tiere (Evertebraten) aus dem württembergischen Stubensandstein (Trias, Mittl. Keuper 4) verglichen mit anderen Ichnocoenosen des Keupers. -Stuttgarter Beitr. z. Naturk. 66, p. 1-29, Stuttgart.
- LOMBARD A. (1956) Géologie sédimentaire. Les séries marines. Paris, Masson et Cie, 722 p.
- LOMBARD A. (1960) Les laminites et la stratification du flysch. Arch. Sciences 13, p. 567-570, Genève.
- LOMBARD A. (1963) Stratonomie des séries du flysch. Eclog. geol. Helv. 56, p. 481-511, Bâle.

- LOMBARD A. (1965) La stratification. Révision, critique et essai de théorie génétique. Eclog. geol. Helv. 58, p. 135-155, Bâle.
- LUCAS J. (1962) La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etudes sur les argiles du Trias. Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 23, 202 p., Strasbourg.
- LUCAS J., CAMEZ T. et MILLOT G. (1959) Determination pratique aux rayons X des minéraux argileux símples et interstratifiés. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 12, 2, p. 21-31, Strasbourg.
- LÜDERS K. (1930) Entstehung der Gezeitenschichtung auf den Watten im Jadebusen. Senckenbergiana, 12, p. 229-254, Frankfurt a. M.
- MACAR P. (1948) Les pseudo-nodules du Famennien et leur origine. Ann. Soc. géol. Belgique, 72, p. 47-74, Liège.
- Mc FARLAN E. (1961) Radiocarbon dating of late quaternary deposits, south Louisiana. Geol. Soc. Amer. Bull. 72, p. 129-158, New York.
- Mc KEE E.D. (1939) Some types of bedding in the Colorado River delta. Journ. Geology, 47, p. 64-81, Chicago.
- Mc KEE E.D. (1957) Primary structures in some recent sediments. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 41, p. 1704-1747, Tulsa.
- Mc KEE E.D., CROSBY E.J. et BERRYHILL H.L. (1967) Flood deposits, Bijou Creek, Colorado, june 1965 - Journ. sedim. Petrol. 37, p. 829-851, Tulsa.
- Mc KEE E.D. et WEIR G.W. (1953) Terminology for stratification and cross-stratification in sedimentary rocks. Geol. Soc. Amer. Bull. 64, p. 381-389, New York.
- MÄGDEFRAU K. (1956) Palaobiologie der Pflanzen. 3e édition. Jena, G. Fischer Verl., 443 p.
- MALAQUIN A. (1904) Le Spirorbis pusillus du Terrain Houiller de Bruay. La formation du tube des Spirorbes et leur adaptation en eau douce à l'époque houillère. - Ann. Soc. géol. Nord, t. 33, p. 63-75, Lille.
- MANGIN J. P. (1964) La séquence-unité et les séries sédimentaires. *in* van Straaten : Deltaic and shallow marine deposits. - Amsterdam, Elsevier Publ. Co., p. 269-274.
- MAUBEUGE P.L. (1959) Contribution à la paléogéographie des grès à Voltzia dans l'Est du Bassin de Paris. - Bull. Soc. Sciences Nancy, n.s., 18, 1, p. 70-122, Nancy.
- MAXSON J.H. et CAMPBELL I. (1935) Stream fluting and stream erosion. Journ. Geology, 43, p. 729-744, Chicago.
- MAYER G. (1954) Neue Beobachtungen an Lebensspuren aus dem unteren Hauptmuschelkalk (Trochitenkalk) von Wiesloch. - N. Jb. Geol. Palaont. Abh. 99, p. 223-229, Stuttgart.
- MEILHAC A. et TARDY Y. (1970) Genèse et évolution des séricites, vermiculites et montmorillonites au cours de l'altération des plagioclases en pays tempéré. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr., 23, 3-4, p. 145-161, Strasbourg.
- MEISCHNER K.D. (1962) Neue Funde von Psammolimulus gottingensis (Merostomata, Xiphosura) aus dem mittleren Buntsandstein von Göttingen. - Paläont. Zeitschr., H. Schmidt-Festband, p. 185-193, Stuttgart.
- MENARD H.W. (1950) Sediment movement in relation to current velocity. Journ. sedim. Petrology, 20, 3, p. 148-160, Tulsa.
- MEYER H. von (1834) Krebse im bunten Sandstein. Mus. Senckenbergianum, 1, p. 293-295, Frankfurt a.M.
- MEYER H. von (1836) Recherches sur les ossements fossiles du Grès bigarré de Soultz-les-Bains (Bas-Rhin). - Mém. Soc. Muséum Hist. Nat. Strasbourg, 2, 3, 17 p., Strasbourg.
- MEYER H. von (1840) Neue Gattungen fossiler Krebse aus Gebilden vom bunten Sandstein bis in die Kreide. 28 p., Stuttgart.
- MICHARD A. (1969) Les dolomies. Une revue. Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 22, p. 1-92, Strasbourg.
- MIKHAYLOV V.N. (1967) Some patterns of formation of a river mouth bar where river factors play an important role (examplified by the Vistula delta). - Soviet Hydrology : select. papers, 6, p. 659-671, Washington.

- MILLOT G. (1949) Relations entre la constitution et la genèse des roches sédimentaires argileuses. - Thèse Sci. Nancy et Géol. Appl. Prosp. Min. 2, 2-4, p. 1-352, Nancy.
- MILLOT G. (1964) Géologie des argiles. Altérations, sédimentologie, géochimie. Paris, Masson et Cie, 499 p.
- MILLOT G., COGNÉ J., JEANNETTE D., BESNUS Y., MONNET B., GURI F. et SCHIMPF A. (1967) - La maladie des grès de la cathédrale de Strasbourg. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 20, p. 131-157, Strasbourg.
- MILLOT G., PERRIAUX J. et LUCAS J. (1961) Signification climatique de la couleur rouge des grès permo-triasiques et des grandes séries détritiques rouges. - Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 14, 4, p. 91-100, Strasbourg.
- MOORE D. (1966) Deltaic sedimentation. Earth-Science Reviews, 1, p. 87-104, Amsterdam.
- MOORE R.C. (1957) Modern methods of Paleoecology. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 41, p. 1775-1801, Tulsa.
- MOORE R.C. (1969) Euthycarcinoidea. *in* Treatise on Invertebrate Paleontology publié sous la direction de R.C. Moore, Part R., Arthropoda 4, 1, p. 196-199, Boulder.
- MORGAN J.P. (1967) Ephemeral estuaries of the deltaic environment. in "Estuaries" publié par G.H. Lauff. - Amer. Assoc. Adv. Sci., Publ. 83, p. 115-120, Washington.
- MÜLLER A.H. (1959) Weitere Beiträge zur Ichnologie, Stratinomie und Ökologie der germanischen Trias. II. - Geologie, 8, p. 239-261, Berlin.
- MÜLLER A.H. (1963) Lehrbuch der Palaozoologie. II, Invertebraten, 3. Jena, G. Fischer Verl., 698 p.
- MÜLLER E. M. (1954) Beiträge zur Kenntnis der Stratigraphie und Paläogeographie des Oberen Buntsandsteins im Saar-Lothringischen Raum. - Annales Univ. Saraviensis, III, 3, p. 176-201, Saarbrücken.
- MÜLLER E. M. et SCHRÖDER E. (1960) Zur Gliederung und Altersstellung des linksrheinischen Buntsandsteins. - Notizbl. hess. Land. Bodenforsch. Wiesbaden, 88, p. 246-265, Wiesbaden.
- MUNSTERHJELM G. (1920) Om Chironomidernas äggläggning och äggrupper. Acta Soc. Fauna et Flora Fennica, 47, 2, p. 1-174, Helsinki.
- NAIRN A.E.M. (1960) Paleomagnetic results from Europe. Journ. Geology, 68, p. 285-306, Chicago.
- NOETLING F. (1880) Die Entwicklung der Trias in Niederschlesien. Zeitschr. deutsch. geol. Ges. 32, p. 300-349, Hannover.
- ORTLAM D. (1967) Fossile Böden als Leithorizonte für die Gliederung des höheren Buntsandsteins im nördlichen Schwarzwald und südlichen Odenwald. - Geol. Jb. 84, p. 485-590, Hannover.
- ORTLAM D. (1970) Eocyclotosaurus woschmidti n. g. n. sp. ein neuer Capitosauride aus dem Oberen Buntsandstein des nördlichen Schwarzwaldes. - N. Jb. Geol. Palaont. Mh., p. 568-580, Stuttgart.
- OTTMANN F. (1965) Introduction à la Géologie marine et littorale. Paris, Masson et Cie, 259 p.
- OTVOS E.G. (1965) Sedimentation-erosion cycles of single tidal periods on Long Island Sound beaches. - Journ. sedim. Petrol. 35, p. 604-609, Tulsa.
- PAINE R.T. (1970) The sediment occupied by recent Lingulid Brachiopods and some paleoecological implications. - Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol. 7, p. 21-31, Amsterdam.
- PEABODY F.E. (1947) Current crescents in the Triassic Moenkopi formation. Journ. sedim. Petrology, 17, p. 73-76, Tulsa.
- PERRIAUX J. (1961) Contribution à la géologie des Vosges gréseuses. Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 18, 236 p., Strasbourg.
- PERRIAUX J. et MÜLLER E.M. (1961) Quelques directions de courants dans le Buntsandstein de la Sarre et de la Lorraine septentrionale. - Bull. Soc. géol. Fr., 7e s., 3, p. 625-628, Paris.

- PETIT G. (1953) Introduction à l'étude écologique des étangs méditerranéens. Vie et Milieu, 4, p. 569-604, Paris.
- PETIT G. et MIZOULE R. (1962) Contribution à l'étude écologique du complexe lagunaire Bages-Sigean (Aude). - Vie et Milieu, 13, p. 205-230, Paris.
- PETIT G. et SCHACHTER D. (1951) Le problème des eaux saumâtres. L'année biologique, 3e s., 27, p. 301-311, Paris.
- PETRUNKEVITCH A. (1953) Paleozoic and mesozoic Arachnida of Europe. Geol. Soc. America Mem. 53, 128 p., New York.
- PETRUNKEVITCH A. (1955) Arachnida. in Treatise on Invertebrate Paleontology publié sous la direction de R.C. Moore, Part P, Arthropoda 2, p. 42-162, Boulder.
- PETTIJOHN F.J. et POTTER P.E. (1964) Atlas and glossary of primary sedimentary structures. - Berlin, Springer-Verl., 370 p.
- PHILIPPI E. (1898) Die Fauna des unteren Trigonodus-Dolomits vom Hühnerfeld bei Schwieberdingen und des sogenannten "Cannstatter Kreidemergels". - Jahresh. Ver. vaterl. Naturk. Württemberg, 54, p. 145-227, Stuttgart.
- PHILIPPI E. (1901) Ueber die Bildungsweise der buntgefärbten klastischen Gesteine der continentalen Trias. - Centralbl. Min. Geol. Pal., p. 463-469, Stuttgart.
- PICARD E. (1909) Über den unteren Buntsandstein der Mansfelder Mulde und seine Fossilien. -Jahrb. Königl. Preuss. geol. L. Anst. Berlin, 30, 1, p. 576-622, Berlin.
- PIMIENTA J. (1958) Les deltas intermittents (existence d'un paléodelta de l'Amazone). Eclog. geol. Helv. 51, p. 551-561, Bâle.
- PIVETEAU J. (1951) Images des mondes disparus. Paris, Masson et Cie, 157 p.
- POBORSKI S.J. (1954) Virgin formation (Triassic) of the St. George, Utah, area. Geol. Soc. Amer. Bull. 65, p. 971-1006, New York.
- POTTER P.E. (1967) Sand bodies and sedimentary environments : a review. Bull. Am. Assoc. Potrol. Geol. 51, p. 337-365, Tulsa.
- POTTER P.E. et MAST R.F. (1963) Sedimentary structures, sand shape fabrics and permeability. I. - Journ. Geology, 71, p. 441-471, Chicago.
- POTTER P.E. et PETTIJOHN F.J. (1963) Paleocurrents and Basin analysis. Berlin, Springer Verl. 296 p.
- PREMOLI SILVA I. (1964) Citaella iulia, n. gen., n. sp., del Trias inferiore della Carnia. -Riv. Ital. Paleont., LXX, 4, p. 657-670, Milano.
- PRUVOST P. (1919) Introduction à l'étude du terrain houiller du Nord et du Pas-de- Calais. La faune continentale du terrain houiller du Nord de la France, - Mém. Carte géol. dét. France, 584 p., Paris.
- QUENSTEDT F.A. (1874) Petrefactenkunde Deutschlands. III. Band : Die Echiniden. Leipzig, Fues's Verl. 720 p.
- REIBLE P. (1962) Die Conchostraken (Branchiopoda, Crustacea) der germanischen Trias. N. Jb. Geol. Palaont. Abh. 114, p. 169-244, Stuttgart.
- REIFF E. (1936) Isopoden aus dem Lias Delta (Amaltheenschichten) Schwabens. Palaeont. Zeitschr. 18, p. 49-90, Stuttgart.
- REINECK H.E. (1960) Über Zeitlücken in rezenten Flachsee-Sedimenten. Geol. Rundschau, 49, p. 149-161, Stuttgart.
- REINECK H.E. (1961) Sedimentbewegungen an Kleinrippeln im Watt. Senckenberg. leth. 42, p. 51-67, Frankfurt a. M.
- REINECK H.E. et WUNDERLICH F. (1967) Zeitmessungen an Gezeitenschichten. Natur u. Museum, 97, p. 193-197, Frankfurt a. M.
- REINECK H.E. et WUNDERLICH F. (1968) Classification and origin of flaser and lenticular bedding. - Sedimentology, 11, p. 99-104, Amsterdam.
- REMANE A. (1958) Ökologie des Brackwassers. in Die Biologie des Brackwassers. Die Binnengewässer publié sous la direction de A. Thienemann, 22, p. 1-216. - Schweizerbart'scher Verl., Stuttgart.

- RICHTER R. (1924) Flachseebeobachtungen zur Paläontologie und Geologie. VII-XI. Senckenbergiana, 6, p. 119-165, Frankfurt a. M.
- RICHTER R. (1926) Flachseebeobachtungen zur Paläontologie und Geologie. XII-XIV. Senckenbergiana, 8, p. 200-224, Frankfurt a. M.
- RICHTER R. (1928) Die fossilen Fährten und Bauten der Würmer, ein Überblick über ihre biologischen Grundformen und deren geologische Bedeutung. - Paläont. Zeitschr. 9, p. 193-235, Stuttgart.
- RICHTER R. (1937) Marken und Spuren aus allen Zeiten. I-II. Senckenbergiana, 19, p. 150-169, Frankfurt a. M.
- RICOUR J. (1962) Contribution à une révision du Trias français. Mém. Carte géol. dét. France, 63, 471 p., Paris.
- RIEK E.F. (1964) Merostomoidea (Arthropoda, Trilobitomorpha) from the Australian Middle Triassic. - Rec. Austr. Mus. 26, 13, p. 327-332, Sydney.
- RIEK E.F. (1968) Re-examination of two Arthropod species from the Triassic of Brookvale, New South Wales. - Rec. Austr. Mus. 27, 17, p. 313-321, Sydney.
- RIMSAITE J. (1957) Über die Eigenschaften der Glimmer in den Sanden und Sandsteinen. Beitr. Min. Petrogr. 6, p. 1-51, Berlin.
- RIVIÈRE A. et VERNHET S. (1958) Contribution à l'étude sédimentologique de l'étang de Leucate-Salses (Languedoc-Roussillon). - Eclog. geol. Helv. 51, p. 561-586, Bâle.
- ROCK-COLOR CHART COMMITTEE (1963) Rock-Color chart, publié par The Geological Society of America, 6 planches, New York.
- ROGER J. (1952) Classe des Chaetopodes. in Traité de Paléontologie publié sous la direction de J. Piveteau, II, Paris, Masson et Cie, p. 167-202.
- ROMASHIN V.V. (1967) Formation of a river mouth bar where marine factors play an important role (examplified by the Lielupe river). - Soviet Hydrology : select. papers, 6, p. 649-658, Washington.
- RÜBENSTRUNK E. (1912) Beitrag zur Kenntnis der deutschen Trias-Myophorien. Mitt. Grossherz. Bad. Geol. L. Anst. 6, p. 85-248, Heidelberg.
- RÜCKLIN H. (1938) Strömungs-Marken im unteren Muschelkalk des Saarlandes. Senckenbergiana, 20, p. 94-114, Frankfurt a. M.
- RÜCKLIN H. (1954) Die Grenzschichten Buntsandstein-Muschelkalk im Saarland ein fossiles Watt. - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver. 35, p. 26-42, Stuttgart.
- RUSSELL R.J. et R.D. (1939) Mississippi River delta sedimentation. *in* Recent marine sediments réimprimé en 1955 par Soc. Econ. Paleont. Min. Spec. Public. n° 4, p. 153-177, Tulsa.
- SACCHI C. F. (1961) L'évolution récente du milieu dans l'étang saumâtre dit "Lago di Patria" (Naples) analysée par sa macrofaune invertébrée. - Vie et Milieu, 12, p. 37-65, Paris.
- SANDERS J.E. (1960) Origin of convoluted laminae. Geol. Mag. 97, p. 409-421, London.
- SANDERS J.E. (1963) Concepts of fluid mechanics provided by primary sedimentary structures. - Journ. sedim. Petrol. 33, 1, p. 173-179, Tulsa.
- SANDERS J.E. et FRIEDMAN G.M. (1967) Origin and occurence of limestones. in Carbonate rocks édité par G.V. Chilingar, H.J. BISSELL et R.W. Fairbridge. - Amsterdam, Elsevier Publ. Co., p. 169-265.
- SARJEANT W.A.S. (1967) Fossil footprints from the Middle Triassic of Nottinghamshire and Derbyshire. - The Mercian Geologist, 2, p. 327-341, Nottingham.
- SCHACHTER D. (1950) Contribution à l'étude écologique de la Camargue. Le milieu aquatique et sa faune. Ann. Inst. océanogr., n.s., 25, p. 1-108, Paris.
- SCHAD A. (1934) Stratigraphische Untersuchungen im Wellengebirge der Pfalz und des östlichen Saargebietes. - Abh. geol. Landesunt. bayer. Oberbergamt, 14, 84 p., München.
- SCHÄFER W. (1962) Aktuo-Palaontologie nach Studien in der Nordsee. Frankfurt a. M., W. Kramer Verl., 666 p.

- SCHIMPER W.P. (1853) Paleontologica alsatica ou Fragments paléontologiques des différents terrains stratifiés qui se rencontrent en Alsace. - Mém. Soc. Muséum Hist. Nat. Strasbourg, 4, 2e et 3e livr., p. 1-10, Strasbourg.
- SCHIMPER W.P. et MOUGEOT A. (1844) Monographie des plantes fossiles du Grès bigarré de la chaîne des Vosges. - Leipzig, G. Engelmann, 83 p.
- SCHINDEWOLF O.H. (1928) Studien aus dem Marburger Buntsandstein III-VII. Senckenbergiana, 10, p. 16-54, Frankfurt a. M.
- SCHMIDT M. (1907) Das Wellengebirge der Gegend von Freudenstadt. Mitt. geol. Abt. k. württ. Stat. Land. 3, 99 p., Stuttgart.
- SCHMIDT M. (1928) Die Lebewelt unserer Trias. Öhringen, Hohenlohe'sche Buchh. F. Rau, 461 p.
- SCHMIDT M. (1938) Die Lebewelt unserer Trias. Nachtrag. Öhringen, Hohenlohe'sche Buchh. F. Rau, 143 p.
- SCHUMACHER E. (1890) Zur Kenntniss des unteren Muschelkalks im nordöstlichen Deutsch-Lothringen. - Mitt. geol. L. Anst. Els. - Lothr. II, p. 111-182, Strasbourg.
- SCHUMACHER E. (1891) Erläuterungen zu Blatt Wolmünster. Geologische Specialkarte von Elsass-Lothringen, 64 p., Strasbourg.
- SCHUMACHER E. (1902) Erlåuterungen zu Blatt Pfalzburg. Geologische Specialkarte von Elsass-Lothringen, 138 p., Strasbourg.
- SCOTT K. M. (1967) Intra-bed palaeocurrent variations in a Silurian flysch sequence, Kirkcudbrightshire, Southern Uplands of Scotland. - Scottish Journ. Geology, 3, p. 268-281, Edinburgh.
- SCRUTON P.C. (1960) Delta building and the deltaic sequence. *in* Recent sediments, northwest Gulf of Mexico publié par the Amer. Assoc. Petrol. Geol., p. 82-102, Tulsa.
- SECRÉTAN S. (1964) Les Crustacés Décapodes du Jurassique supérieur et du Crétacé de Madagascar. - Mém. Mus. Nat. Hist. Nat., n. s., série C, 14, p. 1-226, Paris.
- SÉGUY E. (1950) La biologie des Diptères. Encyclopédie entomologique P. Lechevalier, 26, 609 p., Paris.
- SEILACHER A. (1953 a) Studien zur Palichnologie. I. Über die Methoden der Palichnologie. -N. Jb. Geol. Palaont. Abh. 96, p. 421-452, Stuttgart.
- SEILACHER A. (1953 b) Die geologische Bedeutung fossiler Lebensspuren. Zeitschr. deutsch. geol. Ges. 105, p. 214-227, Hannover.
- SEILACHER A. (1954 a) Studien zur Palichnologie. II. Die fossilen Ruhespuren (Cubichnia). -N. Jb. Geol. Palaont. Abh. 98, p. 87-124, Stuttgart.
- SEILACHER A. (1954 b) Ökologie der triassischen Muschel Lima lineata (SCHLOTH.) und ihrer Epöken. - N. Jb. Geol. Palaont. Mh., p. 163-183, Stuttgart.
- SEILACHER A. (1960) Lebensspuren als Leitfossilien. Geol. Rundschau, 49, p. 41-50, Stuttgart.
- SEILACHER A. (1963) Lebensspuren und Salinitätsfazies. Fortschr. Geol. Rheinld. Westfalen, 10, p. 81-94, Krefeld.
- SEILACHER A. (1964) Biogenic sedimentary structures. *in* Imbrie et Newell : Approaches to Paleoecology, p. 296-316. J. Wiley and Sons, New York, London, Sydney.
- SEILACHER A. (1967) Bathymetry of trace fossils. Marine Geology, 5, p. 413-428, Amsterdam.
- SHEPARD F.P. (1960) Mississippi delta : marginal environments, sediments, and growth. in Recent sediments, northwest Gulf of Mexico publié par The Amer. Assoc. Petrol. Geol., p. 56-81, Tulsa.
- SHERLOCK R.L. (1947) The Permo-Triassic formations. A world review. London, Hutchinson's Publ. 367 p.
- SHIMP N.F., WITTERS J., POTTER P.E. et SCHLEICHER J.A. (1969) Distinguishing marine and freshwater muds. - Journ. Geology, 77, p. 566-580, Chicago.

- SHINN E.A. (1968) Selective dolomitization of recent sedimentary structures. Journ. sedim. Petrology, 38, p. 612-616, Tulsa.
- SHINN E.A., GINSBURG R.N. et LLOYD R.M. (1965) Recent supratidal dolomite from Andros Island, Bahamas. in Dolomitization and Limestone Diagenesis édité par L.C. Pray et R.C. Murray. - Soc. Econ. Pal. Miner. Spec. Publ. 13, p. 112-113, Tulsa.
- SHROCK R.R.((1948) Sequence in layered rocks. A study of features and structures useful for determining top and bottom or order of succession in bedded and tabular rock bodies. -New York, Toronto, London, Mc Graw Hill Book Co., 507 p.
- SIMONS D.B. et RICHARDSON E.V.((1962) The effect of bed roughness on depth-discharge relations in alluvial channels. - Geol. Survey Water-Supply Paper 1498-E, 26 p., Washington.
- SITTLER C. (1965) Le Paléogène des fossés rhénan et rhodanien. Etudes sédimentologiques et paléoclimatiques. Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr. 24, 392 p., Strasbourg.
- SOERGEL W. (1925) Die Fährten der Chirotheria. Eine paläobiologische Studie. Iena, G. Fischer Verl., 92 p.
- SOERGEL W. (1928) Apodiden aus dem Chirotherium-Sandstein. Die Geschichte eines fossilen Tümpels. - Palaeont. Zeitschr. 10, p. 11-41, Stuttgart.
- SOHN I.G. (1968) Triassic Ostracodes from Markhtesh Ramon, Israel. Bull. Geol. Surv. Israel, 44, 71 p., Jerusalem.
- SPECIALE A. (1967) Il Trias in Lombardia (Studi geologici e paleontologici) XXI. Fossili del Trias medio delle valli Trompia e Sabbia. - Riv. Ital. Paleont. 73, 4, p. 1055-1141, Milano.
- STAESCHE K. (1927) Der Buntsandstein des Saarlandes. Ein Beitrag zur Kenntnis der linksrheinischen Unteren Trias. - Festschrift 55. Tagung Oberrh. geol. Ver., p. 39-91, Saarbrücken.
- STAPLIN F.L. (1961) Reef-controlled distribution of Devonian microplankton in Alberta. -Palaeontology, 4, p. 392-424, London.
- STRIGEL A. (1929) Das süddeutsche Buntsandsteinbecken. Verhandl. Naturhist. Mediz. Vereins Heidelberg, N.F., 16, p. 79-465, Heidelberg.
- STOKES W.L. (1947) Primary lineation in fluvial sandstones. A criterion of current direction. - Journ. Geology, 55, p. 52-54, Chicago.
- STØRMER L. (1952) Phylogeny and taxonomy of fossil horse shoe crabs. Journ. Paleontology, 26, p. 630-640, Tulsa.
- STØRMER L. (1955) Merostomata. in Treatise on Invertebrate Paleontology publié sous la direction de R.C. Moore, Part P, Arthropoda 2, p. 4-41, Boulder.
- TASCH P. (1969) Branchiopoda. in Treatise on Invertebrate Paleontology publié sous la direction de R.C. Moore, Part R, Arthropoda 4, 1, p. 128-191, Boulder.
- TERMIER H. et G. (1954) Formation des continents et progression de la vie. Paris, Masson et Cie, 135 p.
- TERRY R.D. et CHILINGAR G.V. (1955) Summary of "Concerning some additional aids in studying sedimentary formations" by M.S. Shvetsov. - Journ. sedim. Petrology, 25, 3, p. 229-234, Tulsa.
- THEOBALD N. (1951) Stratigraphie et Paléogéographie du Buntsandstein dans le SW de l'Allemagne et le NE de la France. - Bull. Soc. Hist. nat. Moselle, 3e série, 12, 36e cahier, p. 1-19, Metz.
- THIENEMANN A. (1954) Chironomus, in Die Binnengewässer publié sous la direction de A. Thienemann. - Schweizerbart'scher Verl., 20, 834 p., Stuttgart.
- THOMPSON R.W. (1968) Tidal flat sedimentation on the Colorado River delta, northwestern Gulf of California. - Geol. Soc. Amer. Mem. 107, 133 p., New York.
- THOMPSON W.O. (1937) Original structures of beaches, bars and dunes. Geol. Soc. Amer. Bull. 48, p. 723-751, New York.

- TINTANT H. (1952) Principes de la systématique. in Traité de Paléontologie publié sous la direction de J. Piveteau, I, p. 41-64. - Masson et Cie, Paris.
- TINTANT H. (1966) La notion d'espèce en Paléontologie. Mises à jour scient. 1, p. 273-294, Paris.
- TORNQUIST A. (1912) Die Binnenmeerfazies der Trias. Geol. Rundschau, 3, p. 111-129, Stuttgart.
- TRICART J. (1955) Aspects sédimentologiques du delta du Sénégal. Geol. Rundschau 43, p. 384-397, Stuttgart.
- TRÜMPY R. (1957) Ein Fund von Halicyne (Crustacea incertae sedis) im mittleren Muschelkalk des Wutachtales. - Eclog. geol. Helv. 50, p. 544-553, Bâle.
- TRUSHEIM F. (1937) Triopsiden (Crust. Phyll.) aus dem Keuper Frankens. Palaeont. Zeitschr. 19, p. 198-216, Stuttgart.
- UBAGHS G. (1953) Classe des Stelléroïdes. in Traité de Paléontologie publié sous la direction de J. Piveteau, III, p. 774-842. Masson et Cie, Paris.
- VAN DER HEIDE S. (1956) Quelques remarques sur Spirorbis pusillus (MARTIN) du Carbonifère des Pays-Bas. Leidse Geol. Meded. 20, p. 100-109, Leiden.
- VAN STRAATEN L.M.J.U. (1953) Rhytmic patterns, on dutch North Sea beaches. Geol. en Mijnbouw, n. s., 15, p. 31-43, Gravenhage.
- VAN STRAATEN L. M. J. U. (1959) Minor structures of some recent littoral and neritic sediments. Geol. Mijnbouw, n. s., 21, p. 197-216, Gravenhague.
- VAN STRAATEN L. M. J. U. (1960) Some recent advances in the study of deltaic sedimentation. -Liverpool-Manchester Geol. Journ. 2, p. 411-442, Liverpool.
- VAN STRAELEN V. (1925) Contribution à l'étude des Crustacés Décapodes de la période jurassique. - Mém. Cl. Sci. Acad. roy. Belgique (2), 7, p. 1-462, Bruxelles.
- VAN STRAELEN V. (1928) Contribution à l'étude des Isopodes méso- et cénozoïques. Mém. Cl. Sci. Acad. roy. Belgique (2), 9, p. 1-68, Bruxelles.
- VATAN A. (1967) Manuel de sédimentologie. Paris, Ed. Technip, 397 p.
- VIA BOADA L. et de VILLALTA J.F. (1966) Heterolimulus gadeai, nov. gen., nov. sp., représentant d'une nouvelle famille de Limulacés dans le Trias d'Espagne. - C.R. som. Soc. géol. Fr., p. 57-59, Paris.
- VISHER G.S. (1965) Fluvial processes as interpreted from ancient and recent deposits. in Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation édité par G.V. Middleton. Soc. Econ. Paleont. and Min. - Spec. Publ. 12, p. 116-132, Tulsa.
- VOLLRATH P. (1924) Beiträge zur Stratigraphie und Paläogeographie des fränkischen Wellengebirges. - N. Jb. Min. Geol. Pal., Beil. B, 50, p. 120-288, Stuttgart.
- VOLLRATH P. (1928) Zur vergleichenden Stratigraphie der Buntsandstein- Muschelkalkgrenzschichten zwischen Nordschwarzwald, Mosbach und Saargebiet. - Jahresber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F., 17, p. 30-35, Stuttgart.
- VOLTZ P.L. (1836) Notice sur le grès bigarré de la grande carrière de Soultz-les-Bains. -Mém. Soc. Muséum Hist. Nat. Strasbourg, 2, 3, 9 p., Strasbourg.
- VON DER BORCH C. (1965) The distribution and preliminary geochemistry of modern carbonate sediments of the Coorong area, South Australia. - Geochim. Cosmochim. Acta, 29, p. 781-799, London.
- WALKER R.G. (1967) Turbidite sedimentary structures and their relationship to proximal and distal depositional environments. Journ. sedim. Petrology 37, p. 25-43, Tulsa.
- WALKER T.R. (1967 a) Formation of red beds in modern and ancient deserts. Geol. Soc. Amer. Bull. 78, p. 353-368, New York.
- WALKER T.R. (1967 b) Color of recent sediments in tropical Mexico : a contribution to the origin of red beds. Geol. Soc. Amer. Bull. 78, p. 917-919, New York.
- WALTHER J. (1900) Das Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit. Berlin, Verl. v. Quelle Meyer, 421 p.

- WARRINGTON G. (1970) The "Keuper" series of the British Trias in the Northern Irish Sea and neighbouring areas. - Nature, 226, 5242, p. 254-256, London.
- WARTH M. (1969) Conchostraken (Crustacea, Phyllopoda) aus dem Keuper (Ob. Trias) Zentral-Württembergs. - Jh. Ges. Naturkde Württemberg, 124, p. 123-145, Stuttgart.
- WEBER F. et LARQUÉ P. (1969) Dosage quantitatif de minéraux par diffraction de rayons X. Deuxième mise au point. - Note interne : Centre Sédim. Géochimie Surface du CNRS, 10 p., Strasbourg.
- WEISS E. (1864) Über Voltzia und andere Pflanzen des bunten Sandsteins zwischen der unteren Saar und dem Rheine, - N. Jahrb. Min. Geol. Pal., p. 278-294, Stuttgart.
- WEISS E. (1869 a) Mittheilungen an Professor H.B. Geinitz. N. Jahrb. Min. Geol. Pal., p. 215-219, Stuttgart.
- WEISS E. (1869 b) Die Entwicklung des Muschelkalkes an der Saar, Mosel und im Luxemburgischen. - Zeitschr. deutsch. geol. Ges., 21, p. 837-849, Stuttgart.
- WEISS E. (1875 a) Blatt Bouss. Erläuterungen zur geologischen Specialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten. n° 45, 28 p., Berlin.
- WEISS E. (1875 b) Blatt Dudweiler, Erläuterungen zur geologischen Specialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten. Gradabtheilung 80. n° 47, 45 p., Berlin.
- WEISS E.((1876) Blatt Saarlouis. Erläuterungen zur geologischen Specialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten. n° 39, 16 p., Berlin.
- WENTWORTH C.K. (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. Journ, Geology, 30, p. 377-392, Chicago.
- WESENBERG-LUND E. (1958) Lesser Antillean Polychaetes, chiefly from brackish water, with a survey and a bibliography of fresh and brackish-water Polychaetes. - Studies of the fauna of Curaçao and other Carribbean Islands, VIII, p. 1-41, The Hague.
- WILCKENS O. (1947) Paläontologische und geologische Ergebnisse der Reise von Kohl-Larsen (1928-29) nach Süd-Georgien. - Abh. senckenberg. naturf. Ges. 474, 66 p., Frankfurt a. M.
- WILLS L.J. (1910) On the fossiliferous Lower Keuper rocks of Worcestershire, with descriptions of some of the plants and animals discovered therein. - Proc. geol. Assoc. 21, p. 249-331, London.
- WILLS L.J. (1947) A monograph of British Triassic scorpions. Palaeontograph. Soc., p. 1-137, London.
- WURSTER P. (1958) Schüttung des Schilfsandsteins im mittleren Württemberg. N. Jahrb. Geol. Paläont. Mh., p. 479-489, Stuttgart.
- WURSTER P. (1963) Les problèmes posés par le "Grès à roseaux" du Trias supérieur. Sci. de la Terre, 9, p. 197-219, Nancy.
- WURSTER P. (1964) Krustenbewegungen, Meeresspiegelschwankungen und Klimaänderungen der deutschen Trias. - Geol. Rundschau, 54, p. 224-240, Stuttgart.
- WURSTER P. (1968) Paläogeographie der deutschen Trias und die paläogeographische Orientierung der Lettenkohle in Südwestdeutschland. - Eclog. geol. Helv. 61, p. 157-166, Bäle.
- ZIMMER C. (1926) Isopoda. in Handbuch der Zoologie fondé par W. Kükenthal, 3, 1, p. 697-766. - Berlin et Leipzig.

PLANCHES HORS-TEXTE

- I Microfaune
- II Méduses
- III Annélides
- IV Annélides
- V Brachiopodes et Mollusques
- VI Araignées et Scorpions
- VII Limules et Crustacés
- VIII Crustacés Conchostracés (esthéries)
- IX Crustacés Conchostracés (esthéries)
- X Crustacés
- XI Crustacés
- XII Crustacés Décapodes
- XIII Crustacés Décapodes
- XIV Crustacés
- XV Crustacés
- XVI Crustacés
- XVII Myriapodes et Insectes
- XVIII Echinodermes ; Poissons

- XIX Poissons
- XX Stégocéphales
- XXI Pontes d'Insectes
- XXII Pontes d'Insectes
- XXIII Pontes d'Insectes
- XXIV Pontes d'Esthéries
- XXV Pontes de Poissons. Traces d'activité animale
- XXVI Traces d'activité animale
- XXVII Traces d'activité animale
- XXVIII Traces d'activité animale. Végétation in situ
- XXIX Végétaux
- XXX Carrières de Grès à Voltzia
- XXXI Carrières de Grès à Voltzia
- XXXII Faciès gréseux
- XXXIII Divers aspects du litage
- XXXIV Figures sédimentaires
- XXXV Figures et structures sédimentaires. Niveaux argileux
- XXXVI Niveaux argileux

PLANCHE I

MICROFAUNE DU GRÈS À VOLTZIA

FORAMINIFÈRES

Figure	1	-	Glomospirella oscillens KOEHN-ZAN., BRÖNN. et GALL Holotype. Grès argileux. Petersbach (9). (x 270). Lame GALL X 2.
Figure	2	-	Glomospirella oscillens KOEHN–ZAN., BRÖNN. et GALL Grès à meules. Vilsberg. (x 270). Lame GALL Va.
Figure	3	-	Glomospirella aff. spirillinoides (GROZD, et GLEBOV.) Grès à meules. Phalsbourg. (x 270). Lame GALL D 1 xc.
Figure	4		Agathamina ? austroalpina KR. – TOLLMANN et TOL. Grès à meules. Vilsberg, (x 290). Lame GALL D 2a.
Figure	5	-	Glomospira sp. Grès à meules. Vilsberg. (x 270). Lame GALL Vd.
Figure	6	-	Glomospira sp. Grès à meules. Vilsberg. (x 270). Lame GALL Va.
Figure	7	-	Lagénidés. Grès à meules. Phalsbourg. (x 90). Lame GALL D 1 xc.
Figure	8	-	Lagénidés. Grès à meules. Phalsbourg. (x 300). Lame GALL D 1 xc.
Figure	9	-	Glomospirella aff. spirillinoides (GROZD. et GLEBOV.) Grès à meules. Phalsbourg. (x 550). Lame GALL D 1a.

OSTRACODES

Figure 10 - Section d'Ostracode. Grès à meules. Phalsbourg. (x 175). Lame GALL D 1a.

(Figures 1 à 8, d'après KOEHN-ZANINETTI, BRÖNNIMANN et GALL, 1969 ; Fig. 9 et 10, d'après GALL et GRAUVOGEL, 1968 a).

PLANCHE 1



PLANCHE II

MÉDUSES DU GRÈS À VOLTZIA

Progonionemus vogesiacus GRAUV, et GALL

Figure 1 - Holotype. Grès à meules. Vilsberg. (x 2). MED 1.

Figure 2 - Jeune exemplaire. Grès à meules. Vilsberg. (x 7). MED 3. Cet échantillon est interprété dans la texte-fig. 2.

(Figures 1 et 2, d'après GRAUVOGEL et GALL, 1962).



PLANCHE III

ANNÉLIDES DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Homaphrodite speciosa GALL et GRAUV. Holotype. Grès à meules, Arzviller (27), AN 3.
- Figure 2 Eunicites triasicus GALL et GRAUV. Holotype, Grès à meules. Arzviller (27). AN 1. La mâchoire supérieure et les expansions parapodiales (p) sont bien visibles.

(Figures 1 et 2, d'après GALL et GRAUVOGEL, 1967 b).



PLANCHE IV

ANNÉLIDES DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Spirorbis cf. pusillus MARTIN. Grès à meules. Arzviller (27), AN 9. Les exemplaires sont fixés sur un oeuf de poisson du genre Palaeoxyris.
- Figure 2 Triadonereis sp. Grès à meules. Arzviller (27). AN 13. Les vers (v) occupent l'abdomen d'une larve d'insecte dont on devine les segments (s).

(Figures 1 et 2, d'après GALL et GRAUVOGEL, 1967 b).

PLANCHE IV



PLANCHE V

BRACHIOPODES ET MOLLUSQUES DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Lingula tenuissima BRONN. Grès à meules. Arzviller (27). BR 1 (x 1,8).
- Figure 2 Modiolus sp. Grès argileux. Arzviller (27). LAM 1 (x 1,8).
- Figure 3 Homomya impressa (ALB.). Grès à meules. Arzviller (27). LAM 2 (x 1,7).
- Figure 4 Entolium discites (SCHLOT.). Grès à meules. Bust (16). LAM 3 (x 1,4).
- Figure 5 Homomya albertii (VOLTZ). Grès argileux. Arzviller (27). LAM 4 (x 1,5).
- Figure 6 Myophoria vulgaris (SCHLOT.). Grès argileux. Arzviller (27). LAM 5 (x 1,8).
- Figure 7 Pleuromya elongata (SCHLOT.). Grès argileux. Soultz-les-Bains. LAM 6 (x 2). L'exemplaire a été récolté en position de vie dans le sédiment.
- Figure 8 Hoernesia sp. Grès argileux. Arzviller (27). LAM 7 (x 1,5).
- Figure 9 Naticopsis gaillardoti LEFR. Grès argileux. Soultz-les-Bains. GAST 1 (x 1,4). L'échantillon a été fortement comprimé par le tassement du sédiment.
- Figure 10 Loxonema obsoletum (ZIETEN). Grès argileux. Soultz-les-Bains. GAST 2 (x 0,7).
- Figure 11 Undularia scalata (SCHLOT.). Grès argileux. Arzviller (27). GAST 3 (x 0,6).



PLANCHE VI

ARAIGNÉES ET SCORPIONS DU GRÈS À VOLTZIA

Figure 1 - Araignée, Grès à meules, Bust (18). AR 10.
Figure 2 - Scorpion, Grès à meules, Bust (17). SC 1.
Figure 3 - Céphalotorax de scorpion, Grès à meules, Marmoutier, 7641.
Figure 4 - Peigne de scorpion, Grès à meules, Bust (17), SC 2.



PLANCHE VII

LIMULES ET CRUSTACÉS DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Limulitella bronni (SCHIMPER). Grès à meules. Adamswiller (7). LIM 34 (x 1,4).
- Figure 2 Triassinella aff. tsorfatia (SOHN). Grès à meules. Bust (17). OST 1 (x 45).
- Figure 3 Triops cancriformis (SCHAEF.). Grès à meules. Vilsberg. AP 1 (x 10). L'organisme a été fossilisé en position dorso-ventrale.
- Figure 4 Triops cancriformis (SCHAEF.). Grès à meules. Vilsberg. AP 5 (x 10). L'organisme a été comprimé latéralement.



PLANCHE VIII

CRUSTACÉS CONCHOSTRACÉS (ESTHÉRIES) DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Isaura minuta minuta (ZIETEN). Grès à meules. Bust (18). E 204 (x 15).
- Figure 2 Isaura minuta minuta (ZIETEN). Grès à meules. Arzviller (27). E 836 (x 17). Exemplaire comprimé par le tassement du sédiment.
- Figure 3 Isaura sp. A. Grès à meules. Arzviller (27). E 362 (x 14).
- Figure 4 Isaura sp. B. Grès à meules. Vilsberg. E 936 (x 30).



PLANCHE VIII

PLANCHE IX

CRUSTACÉS CONCHOSTRACÉS (ESTHÉRIES) DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Palaeolimnadia alsatica REIBLE. Grès à meules, Vilsberg. E 275 (x 12).
- Figure 2 Palaeolimnadiopsis dictyonata REIBLE. Grès à meules. Arzviller (27). E 284 (x 12).
- Figure 3 Praeleaia sp. Grès à meules. Vilsberg. E 22 (x 20).
- Figure 4 Palaeolimnadia alsatica REIBLE. Grès à meules. Vilsberg. E 6580 (x 14). Le corps du Crustacé est souligné par une multitude de petits oeufs. D'autres oeufs, de taille plus élevée, sont également visibles à l'intérieur des valves.


PLANCHE X

CRUSTACÉS DU GRÈS À VOLTZIA

Euthycarcinus kessleri HANDLIRSCH

Exemplaire montrant les appendices et la double segmentation au niveau du thorax. Grès à meules. Arzviller (27). EUT 7.

(ép. : épipodite - p : appendice thoracique - sal : ler segment abdominal - st 12 : 12ème segment thoracique - tl : telson).

(d'après GALL et GRAUVOGEL, 1964)



PLANCHE XI

CRUSTACÉS DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Euthycarcinus kessleri HANDLIRSCH. Face dorsale d'un exemplaire presque entier. Dans l'axe du corps, on distingue les baguettes chitineuses de l'endosquelette. Grès à meules. Adamswiller (7). EUT 5.
- Figure 2 Euthycarcinus kessleri HANDLIRSCH. Région antérieure du corps montrant la première paire d'antennes, les yeux et les quatre premiers appendices thoraciques. Grès à meules. Adamswiller(7). EUT 12.
- Figure 3 Schimperella beneckei BILL, Grès à meules, Bust (18), C 137.
- Figure 4 Palaega pumila GALL et GRAUV. Holotype. Grès à meules. Bust (17). PAL 1.

(Figures 1 et 2, d'après CALL et GRAUVOGEL, 1964 ; Figure 4, d'après GALL et GRAUVOGEL, 1971).



PLANCHE XII

CRUSTACÉS DÉCAPODES DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Antrimpos atavus (BILL). Néotype. Face ventrale d'un exemplaire presque entier. Grès à meules. Vilsberg. PEN 1.
- Figure 2 Antrimpos atavus (BILL). Carapace céphalothoracique et rostre. Grès à meules. Bust (17). PEN 2.
- Figure 3 Antrimpos atavus (BLLL). Abdomen, telson et uropodes. Grès à meules. Vilsberg. PEN 3.
- Figure 4 Clytiopsis argentoratensis BILL. Carapace céphalothoracique. Grès à meules. Arzviller (27). CL 50.

(Figure 4, d'après GALL et FISCHER, 1965).



PLANCHE XIII

CRUSTACÉS DÉCAPODES DU GRÈS À VOLTZIA

Clytiopsis argentoratensis BILL

 Figure 1 - Appendices du céphalothorax. Grès à meules. Arzviller (27). CL 12.
(An : grande antenne - Ec : écaille antennaire - Mx : 3ème maxillipède - Pm : mandibule - P₁, P₂ et P₃ : lère, 2ème et 3ème patte thoracique).

Figure 2 - Extrémité de l'abdomen avec le telson et les uropodes. Grès à meules. Arzviller (27). CL 2.

(Figures 1 et 2, d'après GALL et FISCHER, 1965).

PLANCHE XIII





PLANCHE XIV

CRUSTACÉS DU GRÈS À VOLTZIA

Halicyne ornata TRÜMPY

Vue dorsale de la carapace. Grès à meules. Arzviller (27). H 1. (a : axe médian - 1 : limbe - lf : lobe frontal - ll : lobe latéral - loc : lobe oculaire log : lobe ogival - orb : échancrure orbitaire).

(d'après GALL et GRAUVOGEL, 1967 a).



PLANCHE XV

CRUSTACÉS DU GRÈS À VOLTZIA

Halicyne ornata TRÜMPY

Exemplaire pourvu d'appendices. Grès à meules. Bust (17). H 6a. (an : base des antennes - ex : exopodite - l : limbe - p : appendice ambulatoire).

(d'après GALL et GRAUVOGEL, 1967 a).



PLANCHE XVI

CRUSTACÉS DU GRÈS À VOLTZIA

Halicyne ornata TRÜMPY

- Figure 1 Propodes des appendices ambulatoires. On distingue les épines, les soies et les taches pigmentaires. Grès à meules. Bust (17). H 6b.
- Figure 2 Partie proximale des appendices ambulatoires (p) et exopodites (ex). Grès à meules. Bust (17). H6b.

(Figures 1 et 2, d'après GALL et GRAUVOGEL, 1967 a).

PLANCHE XVI



PLANCHE XVII

MYRIAPODES ET INSECTES DU GRÈS À VOLTZIA

Figure 1 - Diplopode, Grès à meules, Hangviller (20), MYR 1,

- Figure 2 Larve d'Ephéméroptère. Les ébauches alaires et deux des trois cerques sont apparents. Grès à meules. Bust (18). INS 1.
- Figure 3 Aile de blatte. Grès à meules. Arzviller (27). 5335.
- Figure 4 Elytre de Coléoptéroïde. Grès à meules. Arzviller (27). 6884.



PLANCHE XVIII

ÉCHINODERMES DU GRÈS À VOLTZIA

Figure 1 - Section transversale à travers un piquant de Cidaris cf. grandaeva Goldf. Grès argileux. Adamswiller (8). Lame GALL 301. (x 60).

Figure 2 - Vertèbres d'ophiures. Grès argileux. Hangviller (20). ECH 1 (x 30).

POISSONS DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 3 Ecaille de Coelacanthidé. Grès à meules. Vilsberg. P 51 (x 6).
- Figure 4 Dent de poisson (Saurichthys ?). Grès argileux. Hangviller (20). VERT 1 (x 60).

PLANCHE XVIII







PLANCHE XIX

POISSONS DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Chondrostéen (Praesemionotus ?). Grès à meules. Adamswiller (7). P 4.
- Figure 2 Chondrostéen (Dipteronotus ?). Grès à meules. Bust (18). P 50.
- Figure 3 Pericentrophorus aff. minimus JÖRG. Grès à meules. Bust (18). P 8.
- Figure 4 Coelacanthidé. Grès à meules. Arzviller (27). P 1.

.



PLANCHE XX

STÉGOCEPHALES DU GRÈS À VOLTZIA

Figure 1 - Crâne de Capitosauridé. Grès à meules. Graufthal. $(x \ 0, 6)$.

Figure 2 - Clavicule de Stégocéphale. Grès à meules. Bust (17). (x 1,5).

Figure 3 - Mâchoire de Stégocéphale (Odontosaurus ?). Grès à meules. Graufthal. (x 0,6).

PLANCHE XX



PLANCHE XXI PONTES D'INSECTES DU GRÈS À VOLTZIA

Monilipartus tenuis GALL et GRAUV.

Figure 1 - Holotype. Grès à meules. Arzviller (27). PC 12.

Figure 2 - Oeufs présentant des structures internes. Grès à meules. Arzviller (27), PC 15.

Figure 3 - Oeufs éclos. Grès à meules, Arzviller (27), PC 196.

(Figures 1 à 3, d'après GALL et GRAUVOGEL, 1966).

PLANCHE XXI



PLANCHE XXII

PONTES D'INSECTES DU GRÈS À VOLTZIA

Clavapartus latus GALL et GRAUV.

Figure 1 - Trois pontes, Holotype (échantillon du bas de la figure). Grès à meules. Adamswiller (7). PM 149. Figure 2 - Oeufs éclos. Grès à meules. Vilsberg. PM 35.

(Figures 1 et 2, d'après GALL et GRAUVOGEL, 1966).



PLANCHE XXIII

PONTES D'INSECTES DU GRÈS À VOLTZIA

Furcapartus exilis GALL et GRAUV.

Figure 1 - Holotype. Grès à meules. Arzviller (27). PV 19.

Figure 2 - Oeufs. Grès à meules. Arzviller (27). PV 18.

(Figures 1 et 2, d'après GALL et GRAUVOGEL, 1966).



PLANCHE XXIV

PONTES D'ESTHÉRIES DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Coquille de Palaeolimnadia alsatica REIBLE renfermant des oeufs de durée épigénisés en apatite. Grès à meules. Arzviller (27). E 17.
- Figure 2 Cuticule exuviale d'esthérie (Palaeolimnadia ?) avec oeufs à développement immédiat. Grès à meules. Adamswiller (7). E 7.

(Figures 1 et 2, d'après GALL et GRAUVOGEL, 1966).



PLANCHE XXV

PONTES DE POISSONS DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Palaeoxyris regularis BRONGN. Le corps central de teinte plus foncée correspond à l'oeuf proprement dit. Grès à meules. Bust (17). PX 1.
- Figure 2 Ponte à oeufs auréolés. Grès à meules. Arzviller (27). PO 1.

TRACES D'ACTIVITÉ ANIMALE DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 3 Terriers en forme de U (Rhizocorallium var. Glossifungites) dans un niveau argileux. Grès à meules. Vilsberg.
- Figure 4 Rhizocorallium var. Glossifungites dans un grès. Grès argileux. Arzviller (27).

PLANCHE XXV



PLANCHE XXVI

TRACES D'ACTIVITÉ ANIMALE DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Piste de Limulidé (Kouphichnium) sur le mur d'un banc de grès. Grès argileux. Adamswiller(8).
- Figure 2 Empreintes pectinées sur le mur d'un banc de grès. Grès à meules. Lohr (13).
- Figure 3 Empreintes de pas de Vertébrés (Rhynchosauroides) sur le mur d'un banc de grès. Grès argileux. Bust (16).
- Figure 4 Empreinte de pas de Vertébré (Chirotherium ?) sur le mur d'un banc de grès. Grès à meules. Bust (18).



PLANCHE XXVII

TRACES D'ACTIVITÉ ANIMALE DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Terriers de lingules dans un banc de grès. Les organismes (Lingula tenuissima BRONN) s'y trouvent en position de vie. Grès argileux, Hangviller (21). (x 0,8).
- Figure 2 Face supérieure de l'échantillon précédent montrant les embouchures des terriers de lingules. Grès argileux. Hangviller (21). (x 0, 8).
- Figure 3 Trace de locomotion ou de repos (Isopodichnus) au mur d'un niveau argileux. Grès à meules. Vilsberg. (x 1,2).
- Figure 4 Traces de fouissement sur le mur d'un banc de grès. Grès argileux. Lohr (13). (x 0,5).










PLANCHE XXVII

PLANCHE XXVIII

TRACES D'ACTIVITÉ ANIMALE DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Toit d'un banc de grès à rides d'oscillation recoupées par des terriers verticaux (Planolites). Grès argileux. Bust (16). (x 0,4).
- Figure 2 Banc de grès bioturbé par des terriers verticaux et horizontaux (Planolites). Sommet du Grès à meules. Bust (18). (x 0,2).

VÉGÉTATION in situ DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 3 Système radiculaire de Phanérogame disposé perpendiculairement au litage d'un grès. Sommet du Grès à meules. Adamswiller (8). (x 0,4).
- Figure 4 Surface d'un banc de grès rouge du sommet du Grès à meules. Chaque tache claire a été provoquée par le passage d'une racine ou d'un terrier. Adamswiller (8). (x 0, 1).

(Figures 3 et 4, d'après GALL et GRAUVOGEL, 1967 c).



PLANCHE XXIX

VÉGÉTAUX DU GRÈS À VOLTZIA

Figure 1 - Voltzia heterophylla BRONGN. Grès à meules. Vilsberg. (x 0,5). Figure 2 - Anomopteris mougeoti BRONGN. Grès à meules. Lohr (13). (x 0,3).

Figure 3 - Schizoneura paradoxa SCHIMP. et MOUG. Grès à meules. Vilsberg. (x 0,7).

Figure 4 - Equisetites sp. Grès à meules. Lohr (13), (x 0, 3),

PLANCHE XXIX



PLANCHE XXX

CARRIÈRES DE GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Grandes Carrières G. RAUSCHER. Adamswiller (8). Front SW. Le contour lenticulaire des corps de grès sain est bien visible. La flèche indique la limite entre le Grès à meules et le Grès argileux. (Observations faites en juillet 1965).
- Figure 2 Etat du même front de taille en 1970 (d'après une photographie dessin M. WOLF). Au cours de l'avancement des travaux d'exploitation, la disparition des interstrates argileux a rendu moins apparente la distinction des différents bancs du Grès à meules.

PLANCHE XXX





PLANCHE XXXI

CARRIÈRES DE GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Grand chenal à remplissage gréseux et argileux. Grès à meules. Carrière G. SCHNEIDER. Bust (18). Front NW. (Observations faites en avril 1962).
- Figure 2 Niveau argileux dont les lamines se terminent en biseau vers le bord de la lentille. Grès à meules. Grandes Carrières G. RAUSCHER. Adamswiller (8). Front SW. (Observations faites en juin 1963).
- Figure 3 Chenal à remplissage de grès carbonaté (décrit dans la texte-fig. 33). Grès à meules. Carrières A.R. ZIMMERMANN. Lohr (13). Front SW. (Observations faites en juillet 1969).
- Figure 4 Paléotopographie du sommet d'un banc de grès sain. Certaines lamines du niveau argileux surincombant se terminent en biseau à l'approche du seuil. Grès à meules. Grandes Carrières G. RAUSCHER. Adamswiller (8). Front SW. (Observations faites en octobre 1965).



PLANCHE XXXII

FACIÈS GRÉSEUX DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Champ de ripple-marks sur la face supérieure d'un banc de grès sains. Grès à meules. Petersbach (9). (Observations faites en mai 1969).
- Figure 2 Figure de tourbillon (whirl-ball) isolée de la masse d'un banc de grès sain. Grès à meules. Adamswiller (8). (x 0,2).
- Figure 3 Tronc d'arbre dans un grès à plantes. Grès à meules. Petersbach (9).
- Figure 4 Litage oblique dans un grès à plantes. Grès à meules. Adamswiller (8). (x 0, 1).

PLANCHE XXXII



PLANCHE XXXIII

DIVERS ASPECTS DU LITAGE DANS LE GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Lamines régulières et granoclassées d'un grès sain. Grès à meules. Petersbach (9). (x 0,8).
- Figure 2 Structure madrée (Flaserschichtung) dans un grès à plantes (cf. texte-fig. 22). Grès à meules. Hangviller (21). (x 0,8).
- Figure 3 Microstratification entrecroisée au sommet d'un grès à dalles. Surface coupée suivant un plan sub-horizontal (cf. texte-fig. 21). Grès argileux. Adamswiller (8). (x 0, 1).
- Figure 4 Lamines déformées (convolute-bedding) dans un niveau argileux. Grès à meules. Marmoutier. (x 0, 8).



PLANCHE XXXIII

PLANCHE XXXIV

FIGURES SÉDIMENTAIRES DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Cône à ramifications du mur d'un banc de grès. Grès à meules. Adamswiller (8). (x 0,2).
- Figure 2 Flute-casts du mur d'un banc de grès à dalles. L'écoulement se faisait vers le coin inférieur gauche de la figure. Grès à meules. Hangviller (21). (x 0, 3).
- Figure 3 Sillons d'érosion (gouge-channels) et flute-casts sur le mur d'un banc de grès à dalles. L'écoulement se faisait vers le côté gauche de la figure. Grès argileux. Adamswiller((8). (x 0, 1).
- Figure 4 Cannelure d'érosion (groove-cast) sur le mur d'un banc de grès sain. Grès à meules. Petersbach (9). (x 0, 2).









PLANCHE XXXIV

PLANCHE XXXV

FIGURES ET STRUCTURES SÉDIMENTAIRES DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Linéation de délit (parting-lineation) à la surface des lamines d'un grès sain. Grès à meules. Petersbach (9). (x 0, 1).
- Figure 2 Cupules en croissant (crescent-marks) sur le toit des lamines d'un grès sain. L'écoulement se faisait vers le coin supérieur droit de la figure. Grès à meules. Petersbach (9). (x 0,15).
- Figure 3 Rides de déformation à la surface des lamines d'un grès sain. Leur grand axe est perpendiculaire à la linéation de délit. Grès à meules. Petersbach (9). (x 0,8).

NIVEAUX ARGILEUX DU GRÈS À VOLTZIA

Figure 4 - Exploitation du niveau argileux nº 2 d'Adamswiller (cf. texte-fig. 32). Grès à meules. Adamswiller (8).



PLANCHE XXXVI

NIVEAUX ARGILEUX DU GRÈS À VOLTZIA

- Figure 1 Pseudomorphoses de cristaux de sel sur le mur d'un grès à plantes surmontant un niveau argileux. Grès à meules. Hangviller (21). (x 1).
- Figure 2 Contre-empreinte de fentes de dessication sur le mur d'un banc de grès surmontant un niveau argileux. Grès à meules. Bust (18). (x 0, 1).
- Figure 3 Guilielmites isolé d'un nivcau argileux. Grès à meules. Adamswiller (7). (x 1,3).
- Figure 4 Coupe à travers les lamines de la partie inférieure du niveau argileux de Bust (cf. texte-fig. 29). Le granoclassement est bien apparent. Grès à meules. Bust (17), Lame GALL 317/019 a (x 5).



INDEX PALEONTOLOGIQUE

(les chiffres en gras renvoient aux figures dans le texte et aux planches) Acritarches, 76, 83, 122, 131, 134 Aethophyllum, 77, 83, 123, 182 Agathammina, 21, 81, 141 - 221 Albertia, 77, 83, 115, 181 Amphibiens, 63, 115, 145, 181, 182, 188 - 259 Annélides, 24, 81, 120, 121, 182, 188 - 25, 225, 227 Anomopteris, 77, 83, 115, 181 - 277 Antrimpos, 50, 80, 82, 121, 124, 125, 127, 128, 129, 188 - 51, 243 Araignées, 37, 81, 121, 123, 182, 188 - 231 Baiera, 77, 83, 122, 182 Brachiopodes, 22, 81, 121, 129, 131, 159 - 229, 273 Capitosauridés, 63, 82, 115 - 259 Chirotherium, 72, 83, 122 - 271 Chondrostéens, 60, 82, 122 - 257 Cidaris, 58, 82, 159 - 255 Clavapartus, 66, 82, 122 - 263 Clytiopsis, 52, 82, 121, 123, 129, 131, 154, 182, 188 - 53, 54, 243, 245 Coelacanthidés, 62, 82, 122 - 255, 257 Coenothyris, 159 Coprolithes, 68, 83, 122 Crinoïdes, 159 Crustacés, 38, 82, 120, 121, 124, 126, 127, 128, 129, 145, 182, 186, 188 - 38, 45, 46, 48, 49, 50, 53, 54, 56, 57, 221, 233, 235, 237, 239, 241, 243, 245, 247, 249, 251 Cytheracea, 43, 82, 121 Diaphanosoma, 50, 82, 121 Diplopodes, 57, 82, 121, 188 - 253 Echinodermes, 58, 82, 159, 183, 188, 189 -255 Empreintes de pas de Vertébrés, 72, 83, 122, 134, 144, 153, 154 - 271 Empreintes pectinées, 72, 83, 122, 153 - 271 Enantiostreon, 29, 81, 159 Entolium, 28, 81, 121, 131, 159 - 229 Eopecten, 29, 81, 159 Equisetites, 76, 83, 115, 122, 123, 125, 134, 181, 182 - 277 Esthéries, 39, 82, 121, 123, 124, 127, 128, 129, 132, 134, 186, 188 - 235, 237, 267 Eunicites, 24, 81, 121, 128 - 25, 225 Euthycarcinus, 44, 82, 121, 123, 124, 125, 127, 128, 188, 189 - 45, 46, 239, 241 Foraminifères, 19, 81, 140, 141, 145, 159, 182, 183, 188, 189 - 221

Furcapartus, 66, 82, 122 - 265 Gastéropodes, 33, 81, 141, 159, 182, 183, 188 - 229 Gervillia, 28, 141, 159 Glomospira, 20, 81, 140, 141 - 221 Glomospirella, 19, 81, 140, 141, 159 - 221 Graines, 77, 83, 123, 126, 132 Guilielmites, 118 - 291 Halicyne, 55, 82, 121, 123, 127, 128, 129, 131, 182, 188, 189 - 56, 57, 247, 249, 251 Hoernesia, 28, 81, 121, 131, 159 - 229 Holostéens, 61 - 61, 257 Homaphrodite, 26, 81, 121 - 25, 225 Homomya, 31, 81, 120, 121, 128, 129, 131, 132, 141, 154, 159 - 229 Insectes, 58, 82, 121, 123, 126, 131, 134, 182, 188 - 253 Isaura, 39, 82, 121, 131, 182 - 235 Isopodichnus, 71, 83, 122 - 273 Kouphichnium, 71, 83, 122 - 271 Lagénidés, 21, 81, 140, 141, 159 - 221 Lamellibranches, 27, 81, 120, 121, 129, 131, 141, 145, 151, 154, 159, 182, 183, 188 -229 Larves d'insectes, 58, 120, 124, 127, 128, 134, 182, 186 - 253 Limulitella, 35, 71, 81, 120, 121, 124, 128, 129, 182, 188 - 233 Lingula, 22, 70, 81, 120, 121, 128, 129, 131, 132, 145, 151, 154, 159, 161, 182, 183, 188 - 229, 273 Loxonema, 34, 81, 141, 159 - 229 Masculostrobus, 77, 83, 123 Méduses, 22, 81, 120, 121, 128, 182, 186, 188 - 23, 223 Modiolus, 27, 81, 159 - 229 Monilipartus, 65, 82, 122 - 66, 261 Myacites, 159 Myophoria, 30, 80, 81, 120, 121, 123, 128, 129, 131, 140, 141, 154, 159, 184 - 229Myriapodes, 57, 82, 121, 123, 134, 182 - 253 Naticopsis, 33, 81, 141, 159 - 229 Neuropteridium, 77, 83, 115, 122, 181 Odontosaurus, 63, 82, 122 - 259

293

Oeufs d'esthéries, 41, 67, 82, 122 - 237, 267 Oeufs d'insectes, 65, 82, 120, 122, 126, 128, 186, 187 - 261, 263, 265 Oeufs de poissons, 67, 82, 122, 134 - 269 Ophiures, 59, 82, 159 - 255 Ostracodes, 43, 82, 121, 124, 128, 141, 159 -221, 233 Palaega, 49, 79, 82, 121, 127, 128, 186 - 49, 127, 241 Palaeolimnadia, 41, 82, 121 - 237, 267 Palaeolimnadiopsis, 42, 82, 121 - 237 Palaeoxyris, 67, 82, 122, 134 - 269 Pecopteris, 77, 83 122 Pericentrophorus, 61, 82 - 61, 257 Planolites, 73, 83 - 275 Pleuromeia, 76 Pleuromya, 32, 81, 83, 141, 151, 159 - 229 Poissons, 60, 82, 120, 122, 124, 126, 127, 128, 134, 182, 186, 188 - 255, 257, 269 Pollens, 76, 126, 131 Pontes, voir Oeufs Praeleaia, 42. 82, 121 - 237 Progonionemus, 22, 81, 121, 127 - 23, 223 Racines, 77, 83, 107, 120, 123, 124, 132, 134, 144, 147, 184 - 275 Reptiles, 64. 72, 82, 122, 155, 182, 184. 188 - 271 Rhizocorallium, 69, 83, 122, 131, 151, 183, 189 - 70, 269 Rhizomes d'équisétales, 76, 83, 122, 134 Rhynchosauroides, 72, 83 - 271

Saurichthys, 60, 82 - 255 Schimperella, 47, 82, 121, 127, 128 - 48, 241 Schizoneura, 75, 76, 83, 115, 122, 123, 134, 181, 182 - 277 Scorpions, 36, 81, 121, 123, 134, 182, 188 -231 Sertostrobus, 77, 83, 123, 126 Spiriferina, 184 Spirorbis, 26, 81, 121, 128 - 227 Spores, 75 Stégocéphales, 63, 82, 115, 122 - 259 Taenidium, 73, 83, 122 Terriers de lingules, 70, 83, 151 - 273 Traces d'activité animale, 68, 83, 104, 122, 129, 132, 149, 151, 153, 159 - 271, 273, 275 Triadonereis, 27, 81, 121 - 227 Triasocaris, 46, 82, 121 Triassinella, 43, 82, 121 - 233 Triops, 38, 82, 121, 128 - 38, 233 Undularia, 34, 81, 159 - 229 Voltzia, 11, 75, 77, 83, 87, 115, 122, 123, 131, 132, 134, 151, 181, 182 - 277 Voltziostrobus, 77, 83, 123 Worthenia, 141, 159 Yuccites, 77, 83, 115, 123, 134, 181, 182 Zamites, 77, 83, 122

ANNEXE I

LISTE DES CARRIÈRES ÉTUDIÉES ET LOCALISATION DES PRINCIPAUX GISEMENTS FOSSILIFÈRES

+	Carte au Coordonnées Plan de		Plan de	Grès à meules Plan de								
rro de euremen	Localite	1 / 25.000	Lambert	la carrière 1/25.000	Limite inférieure:	Nive	eoux argile Paléobioc.	Orgonismes	Niveaux carbonatés	Limite	Bancs carbonatés	Observations
Nume 1' affi					de brèche dolom. sup.	à crustacés (C)	à lingules et lomellibr. (L)	terrestres (T)	à faune marine		à faune marine	
1	Oeting carrière Dietsch	Forbach 5 - 6	x = 933,30 y= 174,05	т "Х				3 m				
2	Cocheren	Forbach 5-6	x = 929,95 y = 171,95	Ů				7,50m		racin e s in situ		
3 *	Butten carrière R. Grabherr	Bitche 5-6	x = 958,45 y = 153,60	υ							0 m 1,10 m	
4 *	Mackwiller carrière Eberhardt	Sarre - Union 3 - 4	x = 954,95 y = 146,85	J						racines in situ		
5 *	Waldhambach carrière W. Maurer	Bouxwiller 1 - 2	x = 956,30 y = 147,70	Vy I			0,80m			racines in situ	0 m 4,30 m	
6 *	Waldhambach carrière A.Rauscher	Bouxwiller 1 - 2	x = 956,00 y = 146,60	<i>ا</i> ب						racines in situ	Om	
7	Adamswiller carrière G.Rauscher	Bouxwiller 1 - 2	x = 956,55 y = 146,12		13,30m	4,50m 8,20m ⁺						+ niveau décrit p.124

Les chiffres donnent la distance des gisements par rapport à la limite Grès à meules – Grès argileux * Carrière encore en exploitation en 1970

-	E Localité Carte au Coordonnées Plan de						Grès argileux					
de	Locume	1 / 25.000	Lambert	la carrière	Limite	Niveaux argileux			Niveaux	Limite	Bancs	Observations
Numéro I ' affleu				1/25.000	de brèche dolom, sup.	Paléobioc. à crustacés (C)	Paléobioc. à lingules et lamellibr. (L)	Organismes terrestres (T)	carbonatés à faune marine	supérieure	carbonatés à faune marine	
8 *	Adamswiller carrière G. Rauscher	Bouxwiller 1 - 2	x = 956,90 y = 145,95	\searrow	10,50m			3,80m ⁺ 5,30m 8 m		racines in situ _ terriers	0m 0,50m 4,80m	+ niveau décrit p.133
9 *	Petersbach carrière R. Reinberger	Bouxwiller 1 - 2	x = 961,40 y = 143,55	ſŧ,				6m 7,70m	3,50m 5,30m	racines in situ	0 m 2,10 m	
10	P etersbach lieu-dit Kapschitt	Bouxwiller 5 - 6	x = 962,45 y = 141,50	\checkmark				5,50m				
11 *	Petersbach carrière L. Hissung	Bouxwiller 5 - 6	X = 961,75 Y = 141,35	~~+ _T				2 m				
12	Ottwiller	Bouxwiller 5 - 6	x = 957,60 y = 140,90	\mathbf{i}							1,10m	
13 *	Lohr carrière A.R. Zimmermann	Bouxwiller 5 - 6	x = 959,75 y = 139,85	<	12,50m			1,80m				
14	Lohr carrière A.R. Zimmermann	Bouxwiller 5-6	x = 960,90 y = 139,10	Č.				4 m				
15 *	Schoenbourg carrière R. Phillipps	Bouxwiller 5 - 6	x = 961,40 y = 137,80	R	14,50m		1,50m			racine s in situ	Om	

+	Carte au Coordonnées Plan de				Grès argileux							
de	Localite	1 / 25.000	Lambert	la carrière 1/25.000	Limite inférieure: banc de brèche dolom. sup.	Niveaux argileux			Niveaux	Limite	Bancs	Observations
Numéro I'affleui						Paléobioc. à crustacés (C)	Paléobioc. à lingules et lamellibr. (L)	Organismes terrestres (T)	carbonatés à faune marine	supérieure	carbonatés à faune marine	
16	Bust	Bouxwiller	x = 960,70				_					
*	carrière G. Schneider	5-6	y= 136,25				3 m				6,70m	
17	Bust	Bouxwiller	x=959,95	\sim		5 m +	0,50m					+ niveau
	carriere G. Schneider	5-6	y = 136,10	1								decrif p.126
18	Bust	Bouxwiller	x = 960,25	\sim		7 m		11 m	10 m	racines in situ	2.50 m	
*	G. Schneider	e der 5-6 y=135,95 c ¹¹	c ^t T		8,50m				 terriers	_,		
19	Graufthal carrière Brua	Bouxwiller 5 - 6	x = 960,95 y = 136,35	(r)								3 m : riche gisement de vertébrés(V) du G.à meules
20 *	Hangviller carrière L. Mertz	Bouxwiller 5 - 6	x = 959,75 y = 134,75	Ũ	12,50m			2 m 8 m 9,60m		racines in situ	2,70m	
21 *	Hangviller carrière L.Mertz	Bouxwiller 5 - 6	x = 959,65 y = 134,60	T2 TIA	12,30m		3m+	5,10m 9 m	8,30m		2,20m	+ niveau décrit p.129
22	Hangviller	Bouxwiller 5 - 6	x = 959,45 y = 134,60	C							2,30m	
23	Buchelberg	Bouxwiller 5 – 6	x = 962,45 y = 132,65	>								

1	Localita	Carte au	Coordonnées	Plan de	Grès à meules Plan de						Grès argileux	
de	Locame	1 / 25.000	Lambert	la corrière	Limite	Nive	eaux argileux		Niveaux	Limite	Bancs	Observations
Numéro I ' affleu				1/25.000	de brèche dolom. sup.	Paléobioc. à crustacés (C)	Paléobioc. à lingules et lamellibr. (L)	Organismes terrestres (T)	carbonatés à faune marine	supérieure	carbonatés à faune marine	
24	Vilsberg carrière Philippe	Bouxwiller 5 - 6	x = 960,75 y = 131,95	°,		8,80m 9m			10,70 m	racines in situ	0,70m	
25	Phalsbourg carrière H.Fischer	Saverne 1-2	x = 960,70 y = 129,00	Ĵ		6,50m			7,50m	racines in situ		
26	Arzviller	Sarrebourg 3 - 4	x = 956,85 y = 125,90	\mathcal{O}	12 m							
27	Arzviller carrière Bopp-Dintzner	Sarrebourg 3-4	x = 956,30 y = 125,60	LUCC		6 m 10 m	1 m			racines in situ	0,50m	
28 *	Niderviller carrière communale	Sarrebourg 3 - 4	x = 951,95 y = 123,55	Ţ	12 m			9,50 m				
29	Marmoutier carrière A.Zeller	Saverne 1 - 2	x = 969,60 y = 124,80	т∋				9 m				
30	Allenwiller	Saverne 5 - 6	x = 970,50 y = 118,30	<u> </u>								
31	Wasselonne lieu-dit la Papeterie	Saverne 7 - 8	x= 974,85 y= 116,60	$\langle \hat{c} \rangle$						racines in situ		

néro de ffleurement	Localité	Carte au 1 / 25.000	Coordonnées Lambert	Plan de la carrière 1/25.000	Limite inférieure: banc	Nive Paléobioc.	Grès à eaux argile Paléobioc. à lingules	meules ^{ux} Organismes	Niveaux carbonatés	Limite supérieure	Grès argileux Bancs carbonatés	Observations
NN.					de brèche dolom, sup.	a crustaces (C)	et lamellibr. (L)	(T)	marine		marine	
32	Soultz-les-Bains carrière royale	Molsheim 3 - 4	x = 980,60 y = 109,75	T				4 m			3,30m 5,70m	
33	Niederhaslach	Molsheim 1 - 2	x = 970,90 y = 105,90	ر ر						terriers		

ANNEXE II

COUPES DÉTAILLÉES DES PRINCIPALES CARRIÈRES DE GRÈS À VOLTZIA

AFFLEUREMENT nº 7 : ADAMSWILLER (carrière G. RAUSCHER : front SW)

GRÈS ARGILEUX

1,50 m : grès à dalles gris et rose 0,15 m : banc d'argilite gréseuse verte 1,00 m : grès gris 1,00 m : grès gris

GRÈS À MEULES

0,30 m : niveau argileux vert à lamellibranches (Myophoria, Homomya)
3,50 m : grès sain gris
0,40 m : niveau argileux vert, rouge au sommet
3,00 m : grès sain gris et rose en deux bancs avec contact par érosion
0,40 m : niveau bréchique carbonaté
0,60 m : niveau argileux vert renfermant une riche paléobiocénose à Crustacés (textefig. 28)
2,50 m : grès sain gris, rose au sommet
0,30 m : niveau bréchique carbonaté
0,30 m : niveau bréchique carbonaté
0,80 m : grès sain gris et rose
1,50 m : grès sain rose, gris au sommet

COUCHES INTERMÉDIAIRES

0,20 m : banc de brèche dolomitique supérieur Base de la carrière.

AFFLEUREMENT n° 8 : ADAMSWILLER (carrière G. RAUSCHER : front SW) (Pl. XXX ; Pl. XXXI, fig. 2 et 4 ; Pl. XXXV, fig. 4)

GRÈS COQUILLIER

0,35 m : grès dolomitique
2,00 m : banc argileux gris-vert
0,35 m : grès dolomitique
0,60 m : banc argileux gris-vert
0,05 m : dolomie fossilifère
0,60 m : banc argileux gris-vert fossilifère
0,25 m : dolomie
0,25 m : banc argileux vert
0,50 m : dolomie en plusieurs petits bancs de 5 à 10 cm

GRÈS ARGILEUX

0,40 m : banc argileux rouge, vert au sommet

0,80 m : grès à dalles rose avec des taches grises ; le mur porte des pistes de Limulidés (Pl. XXVI, fig. 1)

- 0,30 m : grès gris 0,06 m : banc argileux et gréseux vert 0,10 m : grès gris carbonaté 0,20 m : dolomie fossilifère 0,05 m : banc argileux rouge 0,05 m : dolomie 0,05 m : banc argileux rouge 0,05 m : dolomie 0,05 m : banc argileux rouge 0,05 m : dolomie 0,40 m : banc argileux rouge et vert à passées carbonatées 0,30 m : grès carbonaté 0.25 m : banc argileux rouge 0,35 m : grès à dalles rose avec des taches grises ; nombreux Rhizocorallium 0,20 m : banc argileux et gréseux rouge 0,80 m : grès à dalles rose avec des taches grises 0,80 m : grès à dalles rose avec des taches grises, mur à sole-marks, toit à microstratification entrecroisée 0,45 m : banc argileux vert, rouge au sommet 0,30 m : dolomie fossilifère 0,20 m : banc argileux vert et rouge 0,30 m : niveau carbonaté à riche faune marine (lamellibranches, échinodermes)
- GRÈS À MEULES
 - 0,30 m : grès rose à terriers d'organismes fouisseurs (Rhizocorallium) et racines in situ (Pl. XXVII, fig. 3-4)
 3,00 m : grès sain rose à taches grises et passées carbonatées ; mur à sole-marks, figures de tourbillon dans la masse
 1.00 m : niveau argileux vert à organismes terrestres et racines in situ (texte-fig. 32)
 - 0,80 m : grès sain gris
 - 0,20 m : niveau argileux vert à nombreuses plantes
 - 2.00 m : grès sain rose
 - 0,35 m : niveau bréchique carbonaté
 - 0,80 m : niveau argileux vert avec racines in situ
 - 1,00 m : grès sain gris
 - 1,00 m : grès gris à plantes

COUCHES INTERMÉDIAIRES

0,30 m : banc de brèche dolomitique supérieur

Niveau inférieur de la carrière.

AFFLEUREMENT n° 9 : PETERSBACH (carrière R. REINBERGER : front N) (Pl. XXXII, fig. 1)

GRÈS ARGILEUX

0,07 m : grès carbonaté à fragments de Vertébrés
0,10 m : banc argileux rouge
0,65 m : grès carbonaté altéré fossilifère
0,15 m : banc argileux vert
0,05 m : grès gris
0,12 m : banc argileux gris
0,10 m : grès carbonaté
0,70 m : banc argileux gris-vert
0,04 m : grès carbonaté
0,20 m : banc argileux et gréseux vert
0,45 m : dolomie gréseuse fossilifère
0,35 m : dolomie gréseuse fossilifère (lamellibranches, foraminifères, terriers d'organismes fouisseurs). Locus typicus de Glomospirella oscillens KOEHN-Z., BRÖNN. et GALL.

GRÈS À MEULES

0,40 m : grès sain rose avec des taches grises et des racines in situ 1,70 m : grès sain rose avec des taches grises ; mur à sole-marks 0,80 m : grès sain rose 0,10 m : grès carbonaté ; toit à ripple-marks 0,05 m : grès argileux vert 2,30 m : grès sain rose, gris au sommet ; le toit est couvert par une magnifique surface à ripple-marks (Pl. XXXII, fig. 1) ; vers le tiers supérieur s'intercale un grès carbonaté fossilifère (Myophoria, Pleuromya) 0,40 m : niveau bréchique carbonaté à faune marine (Myophoria, Naticopsis) 0,60 m : niveau argileux vert à nombreux végétaux ; il s'y intercale une passée gréseuse à empreintes de pas de Vertébrés et racines in situ 1,00 m : grès gris à taches carbonatées 0,70 m : niveau argileux vert à végétaux 0,30 m : niveau carbonaté non remanié Base de la carrière. AFFLEUREMENT nº 13 : LOHR (carrière A-R. ZIMMERMANN : front SW) (Pl. XXXI, fig. 3) GRÈS ARGILEUX 0,10 m : banc carbonaté 0,10 m : banc argileux gris-vert 1,50 m : grès à dalles rose ; mur à nombreuses pistes d'Invertébrés 0,10 m : banc argileux et gréseux vert GRÈS À MEULES 1,50 m : grès sain rose ; toit à ripple-marks 0,20 m : grès carbonaté 0,30 m : niveau argileux vert à végétaux 0,50 m : grès sain gris ; toit à ripple-marks 0,20 m : niveau argileux vert 1,50 m : grès sain rose 0,35 m : grès gris et rose 0,20 m : niveau bréchique carbonaté 2,00 m : grès sain rose 0,20 m : niveau bréchique carbonaté 2,00 m : grès sain rose ; toit à ripple-marks 2,00 m : niveau argileux vert, rouge au sommet, érodé latéralement par un grès à plantes (texte-fig. 27) 1,50 m : grès sain gris et rose COUCHES INTERMÉDIAIRES 0,30 m : banc de brèche dolomitique supérieur

AFFLEUREMENT n° 16 : BUST (carrière G. SCHNEIDER : front NW)

GRÈS COQUILLIER

0,10 m : grès dolomitique
0,40 m : banc argileux vert et rouge, bioturbé
0,10 m : grès dolomitique
1,10 m : banc argileux beige, bioturbé
0,20 m : dolomie gréseuse fossilifère
0,25 m : dolomie gréseuse, bréchique, fossilifère
0,60 m : grès dolomitique argileux, bioturbé
0,40 m : grès dolomitique avec passée bréchique ; toit à Rhizocorallium

GRÈS ARGILEUX

0,60 m : grès à dalles rose ; toit à Rhizocorallium
0,05 m : banc argileux rouge
0,05 m : grès carbonaté
0,25 m : banc argileux et gréseux rouge
0,15 m : grès rose devenant carbonaté vers le sommet ; mur à empreintes de pas de Vertébrés (Rhynchosauroides ; Pl. XXVI, fig. 3) ; toit à Rhizocoral
0,15 m : banc argileux et gréseux rouge, très fossilifère (Myophoria, Lingula et leurs terriers)
1,10 m : grès à dalles rose ; toit à ripple-marks
3,00 m : banc argileux rouge avec passées gréseuses et carbonatées
0,70 m : grès à dalles rose
0,60 m : banc argileux et gréseux rouge
1,00 m : grès à dalles rose
0,25 m : banc argileux rouge

GRÈS À MEULES

1,50 m : grès sain rose
2,50 m : grès sain rose
1,00 m : niveau argileux vert renfermant une riche paléobiocénose à lingules et à lamellibranches
0,30 m : grès argileux vert
6 à 7 m : grès sain gris en plusieurs bancs cachés par les éboulis

Base de la carrière.

AFFLEUREMENT n° 18 : BUST (carrière G. SCHNEIDER : front NE) (Pl. XXXI, fig. 1)

GRÈS ARGILEUX

0,40 m : grès à dalles rose
0,40 m : banc argileux vert, rouge au sommet, à passées carbonatées
0,35 m : banc carbonaté fossilifère
0,40 m : banc argileux et gréseux rouge
0,10 m : grès gris
0,60 m : banc argileux et gréseux rouge
0,10 m : grès gris
0,25 m : banc argileux rouge
0,40 m : banc argileux et gréseux à convolute-bedding
0,60 m : banc argileux rouge

GRÈS À MEULES

2,50 m : grès sain rose ; sommet à taches grises, terriers d'organismes fouisseurs (Pl. XXVIII, fig. 2) et racines in situ 2,00 m : grès sain rose 0.80 m : niveau argileux vert, rouge au sommet avec passées carbonatées et racines in situ 1,50 m : grès sain rose 1,00 m : niveau argileux vert à paléobiocénose à crustacés 0,40 m : grès sain gris ; mur à pseudo-nodules 0,60 m : niveau argileux vert à paléobiocénose à crustacés 0,80 m : grès sain rose et gris 0,20 m : niveau bréchique carbonaté 1,20 m : grès sain rose 0,10 m : niveau argileux vert à organismes terrestres 0,30 m : grès gris 0,15 m : niveau argileux vert 0,30 m : grès gris 0,20 m : niveau argileux vert 2,00 m : grès sain rose

Base de la carrière.

AFFLEUREMENT n° 20 : HANGVILLER (carrière L, MERTZ : front SW)

GRÈS COQUILLIER

1,00 m : grès carbonaté altéré 0,05 m : banc argileux vert 0,15 m : dolomie gréseuse fossilifère 0,05 m : banc argileux vert 0,10 m : grès carbonaté 0,05 m : banc argileux vert GRÈS ARGILEUX 0,50 m : grès à dalles gris 0,20 m : banc argileux et gréseux vert 0,70 m : grès à dalles gris ; mur à sole-marks 1,10 m : banc argileux et gréseux gris-vert, bioturbé 0,65 m : grès à dalles gris 0,20 m : banc argileux et gréseux vert, bioturbé 0,40 m : grès carbonaté fossilifère (lamellibranches, gastéropodes, échinodermes) 0.10 m : banc argileux vert 0,20 m : grès rose s'enrichissant en carbonates vers le sommet 0,10 m : banc argileux et gréseux rouge 0,90 m : grès à dalles rose renfermant plusieurs niveaux à ripple-marks 0,20 m : banc argileux rouge 0,10 m : banc argileux et gréseux vert, bioturbé, avec quelques végétaux 0,30 m : grès rose, gris au sommet, bioturbé 0,40 m : banc argileux et gréseux vert, à sommet bioturbé 0,35 m : banc argileux et gréseux vert, bioturbé avec quelques végétaux GRÈS À MEULES

0,60 m : grès gris à plantes et racines in situ
1,80 m : niveau argileux vert à organismes terrestres, érodé latéralement par un grès
1,00 m : grès sain gris ; toit couvert de seuils et de sillons
2,00 m : grès sain gris
2,00 m : grès sain rose
0,10 m : niveau bréchique carbonaté
1,00 m : niveau argileux vert, rouge au sommet, à nombreuses plantes
1,50 m : grès sain rose
0,50 m : niveau argileux vert, rouge au sommet, à organismes terrestres
2,00 m : grès sain gris

COUCHES INTERMÉDIAIRES

0,40 m : banc de brèche dolomitique supérieur

Base de la carrière.

AFFLEUREMENT n° 21 : HANGVILLER (carrière L. MERTZ : front NE)

GRÈS ARGILEUX

1,00 m : grès à dalles gris ; toit à ripple-marks 0,15 m : banc argileux vert s'enrichissant en carbonates vers le sommet 0,10 m : grès gris ; toit à ripple-marks et à Rhizocorallium 0,15 m : banc argileux gris s'enrichissant en carbonates vers le sommet 0,20 m : grès gris ; mur à sole-marks 0,05 m : banc argileux vert 0,10 m : grès gris 0,40 m : grès carbonaté fossilifère (lamellibranches, gastéropodes, échinodermes) 0,10 m : grès gris 0,10 m : grès gris 0,10 m : banc argileux et gréseux rouge 0,30 m: grès à dalles rose
0,05 m: banc argileux et gréseux rouge
0,30 m: grès à dalles rose
0,15 m: grès carbonaté
0,05 m: banc argileux et gréseux rouge
0,40 m: grès argileux rose à nombreuses Lingula in situ (Pl. XXVII, fig. 1-2); toit à Rhizocorallium
0,15 m: grès rose
0,50 m: banc argileux et gréseux vert, rouge au sommet, bioturbé

GRÈS À MEULES

0,60 m : grès sain gris 1,00 m : grès sain gris 2,60 m : grès sain gris 0,40 m : niveau bréchique carbonaté 1,00 m : niveau argileux vert et rouge à belles racines in situ 1,50 m : grès sain rose 0,10 m : niveau argileux vert et rouge 0,80 m : grès sain gris et rose 0,30 m : niveau bréchique carbonaté fossilifère (ostracodes) 1,00 m : grès gris à plantes 1,50 m : grès sain rose 0,10 m : niveau bréchique carbonaté 0,50 m : grès sain gris 0,10 m : niveau bréchique carbonaté 0,50 m : grès sain gris 0,10 m : niveau argileux et gréseux vert 0,80 m : grès sain gris ; toit à pistes d'Invertébrés

COUCHES INTERMÉDIAIRES

0,20 m : banc de brèche dolomitique supérieur

Base de la carrière.

AFFLEUREMENT n° 24 : VILSBERG (carrière PHILIPPE : front SE)

GRÈS ARGILEUX

```
0,50 m : dolomie gréseuse fossilifère (lamellibranches, lingules)
     0,10 m : grès carbonaté
     0,20 m : grès gris
     0,30 m : dolomie gréseuse
     0,10 m : banc argileux et gréseux gris
GRÈS À MEULES
     0,40 m : grès argileux rose à racines in situ
     3,00 m : grès sain gris, rose au sommet
     3,20 m : grès sain rose
     0,20 m : grès gris
     0,80 m : grès sain gris
     1,20 m : grès sain gris
     0,10 m : niveau argileux vert à paléobiocénose à crustacés. Locus typicus de Pro-
              gonionemus vogesiacus GRAUV. et GALL
     1,80 m : grès sain rose ; toit à ripple-marks
     0,15 m : niveau bréchique carbonaté à galets dolomitiques fossilifères (Myophoria,
              foraminifères)
     1,40 m : grès sain rose, gris au sommet
```

Base de la carrière cachée par les éboulis

AFFLEUREMENT n° 27 : ARZVILLER (carrière BOPP-DINTZNER : front W)

GRÈS ARGILEUX

- 0,40 m : banc argileux et gréseux vert
- 0,30 m : grès gris
- 1,50 m : banc argileux et gréseux vert, rouge au sommet
- 0,05 m : grès carbonaté
- 0,30 m : dolomie gréseuse jaunâtre, très fossilifère (lamellibranches, gastéropodes, échinodermes)
- 0,25 m : dolomie gréseuse grise, très fossilifère (lamellibranches, gastéropodes, échinodermes)
- 0,10 m : grès carbonaté
- 0,10 m : banc argileux et gréseux rouge
- 0,25 m : grès à dalles rose ; mur à empreintes de pas de Vertébrés et à terriers ; toit à Rhizocorallium (Pl. XXV, fig. 4)
- GRÈS À MEULES

0,50 m : niveau argileux et gréseux rouge à lamellibranches (Homomya) et passée gréseuse à racines in situ
0,65 m : niveau argileux vert à paléobiocénose à lingules et à lamellibranches. Locus typicus de Homaphrodite speciosa GALL et GRAUV.
0,60 m : grès sain rose
1,20 m : grès sain rose et gris
1,50 m : grès sain rose
1,20 m : grès sain gris à sole-marks
0,30 m : niveau argileux vert
1,50 m : grès gris à passées carbonatées
1,50 m : grès sain rose
0,25 m : niveau argileux vert à paléobiocénose à crustacés
Plusieurs mètres de grès gris cachés par les éboulis

Base de la carrière

AFFLEUREMENT n° 32 : SOULTZ-LES-BAINS (carrière royale : front NE)

GRÈS COQUILLIER

6 à 10 m : grès carbonatés et dolomies en plusieurs bancs séparés par des niveaux argileux beiges ou verts

GRÈS ARGILEUX

0,20	m	: banc	argileux rouge à terriers d'organismes fouisseurs
0,10	m	: banc	argileux et gréseux vert, bioturbé
0,20	\mathbf{m}	: grès	carbonaté
0,15	m	: grès	argileux rouge fossilifère à lamellibranches in situ et Rhizocorallium
0,03	m	: grès	carbonaté
0,05	m	: bane	argileux et gréseux vert
0,15	m	: grès	argileux carbonaté fossilifère
2,00	m	: grès	carbonaté en plusieurs bancs
0,10	m	: banc	argileux vert à paléobiocénose à lingues et à lamellibranches
0,30	m	: grès	argileux carbonaté très fossilifère (lamellibranches, gastéropodes, échi-
		node	rmes)
0,30	m	: grès	carbonaté
0,10	m	: grès	carbonaté rose
0,75	m	: grès	à dalles rose
0,10	m	: grès	carbonaté gris
0,50	m	: banc	argileux rouge
0,25	m	: grès	à dalles rose
0,35	m	: banc	argileux et gréseux rouge, bioturbé, à lingules
0,10	m	: grès	carbonaté

0,05 m : banc argileux et gréseux rouge, vert au sommet
0,10 m : grès rose à Rhizocorallium
0,05 m : banc argileux et gréseux rouge à Pleuromya in situ, Lin R hizocorallium
0,10 m : grès rose à lamellibranches in situ et Rhizocorallium
0,10 m : banc argileux rouge, bioturbé
0,10 m : grès rose à lamellibranches in situ
0,03 m : banc argileux rouge
0,10 m : grès rose à passées carbonatées
0,15 m : banc argileux rouge

GRÈS À MEULES

3,50 m : grès sain rose
0,05 m : niveau bréchique carbonaté
0,90 m : niveau argileux vert, rouge au sommet, à végétaux
0,05 m : niveau bréchique carbonaté
1,00 m : grès sain rose à racines in situ
0,70 m : grès sain rose

Base de la carrière en partie cachée par les éboulis.
LISTE DES FIGURES

- 1 Esquisse géologique du Nord des Vosges et localisation des principales carrières de Grès à Voltzia, p. 14
- 2 Jeune exemplaire de Progonionemus vogesiacus GRAUV, et GALL, p. 23
- 3 Exemplaire sexué de Progonionemus vogesiacus GRAUV. et GALL. p. 23
- 4 Reconstitution de l'appareil masticateur d'Eunicites triasicus GALL et GRAUV, p. 25
- 5 Région antérieure du corps de Homaphrodite speciosa GALL et GRAUV.p. 25
- 6 Reconstitution de Triops cancriformis minor TRUSHEIM, p. 38
- 7 Reconstitution de Euthycarcinus kessleri HANDLIRSCH, p. 45
- 8 Reconstruction tridimensionnelle de la partie moyenne du thorax de Euthycarcinus kessleri HANDLIRSCH. p. 46
- 9 Reconstitution de Schimperella beneckei BILL, p. 48
- 10 Reconstitution de Palaega pumila GALL et GRAUV, p. 49
- 11 Reconstitution de Antrimpos atavus (BILL), p. 50
- 12 Reconstitution de Clytiopsis argentoratensis BILL. p. 53
- 13 Vue latérale du céphalothorax de Clytiopsis argentoratensis BILL, p. 54
- 14 Reconstitution de Halicyne ornata TRÜMPY, p. 56
- 15 Coupe transversale interprétative à travers la carapace des Halicynés. p. 57
- 16 Reconstitution de Pericentrophorus minimus JÖRG, p. 61
- 17 Oeufs de Monilipartus tenuis GALL et GRAUV. révélant des structures internes en relation avec le développement des embryons. p. 66
- 18 Structure du terrier de Rhizocorallium var. Glossifungites. p. 70
- 19 Coupe schématique et subdivisions du Grès à Voltzia dans le Nord des Vosges. p. 91
- 20 Courbes granulométriques cumulatives et courbes de fréquence des faciès gréseux du Grès à Voltzia et du Muschelsandstein, p. 96
- 21 Bloc-diagramme illustrant l'origine de la microstratification entrecroisée à partir de rides en croissant, p. 100
- 22 Diagramme montrant l'origine de la structure madrée (Flaserschichtung) à partir de trains successifs de ripple-marks. p. 101
- 23 Ripple-marks produits par un courant unidirectionnel, p. 106
- 24 Relations entre les structures sédimentaires et le régime hydrodynamique. p. 108
- 25 Bloc-diagramme d'un corps de grès sain, p. 109
- 26 Coupe d'un chenal du Grès à meules, p. 113
- 27 Détail du bord d'un chenal ravinant un niveau argileux (Grès à meules). p. 114
- 28 Profil paléoécologique du niveau argileux n° 1 d'Adamswiller (Grès à meules). Coupe lithologique et distribution qualitative et quantitative des organismes. p. 125
- 29 Profil paléoécologique du niveau argileux de Bust (Grès à meules). Coupe lithologique et distribution qualitative et quantitative des organismes. p. 127

- 30 Distribution graphique des longueurs du corps d'une soixantaine d'exemplaires de Palaega pumila GALL et GRAUV. provenant d'un même gisement (niveau argileux de Bust). p. 127
- 31 Relevé paléoécologique d'un niveau argileux à lingules et à lamellibranches (Hangviller), p. 130
- 32 Relevé paléoécologique du niveau argileux nº 2 d'Adamswiller, p. 133
- 33 Coupe d'un chenal du Grès à meules, p. 138
- 34 Bloc-diagramme illustrant la sédimentation deltaïque dans le Nord des Vosges à l'époque du Grès à meules. p. 145
- 35 Orientation des paléocourants dans le Grès à Voltzia, p. 166
- 36 Directions et sens des écoulements dans le Grès à meules déduits du litage oblique et des figures de courant, p. 167
- 37 Variations des concentrations des éléments traces et des éléments majeurs, sur une épaisseur de 60 cm, dans le niveau argileux n° 1 d'Adamswiller (Grès à meules). p. 174
- 38 Variations de la composition chimique des illites des faciès argileux classés par bore croissant. p. 176
- 39 Teneurs en bore de quelques niveaux argileux du Grès à Voltzia. p. 177

LISTE DES TABLEAUX

- I Liste et répartition des organismes et des témoins de l'activité biologique identifiés dans le Grès à Voltzia du Nord des Vosges, p. 81
- II Subdivisions stratigraphiques du Buntsandstein des Vosges et leur articulation avec le Muschelkalk, p. 88
- III Principaux paramètres granulométriques des faciès gréseux du Grès à Voltzia et du Muschelsandstein. p. 95
- IV Composition minéralogique de quelques échantillons de grès sains. p. 97
- V Composition minéralogique de quelques échantillons de grès à plantes. p. 112
- VI Teneurs en matière organique de quelques niveaux argileux du Grès à meules. p. 118
- VII Nomenclature et classification des roches argileuses. p. 119
- VIII Liste des organismes et des témoins de l'activité biologique rencontrés dans les niveaux argileux du Grès à meules. p. 121
- IX Récapitulation des principaux caractères des niveaux argileux du Grès à meules. p. 135
- X Composition minéralogique de quelques dépôts carbonatés du Grès à meules. p. 139
- XI Liste et répartition des genres et des espèces rencontrés dans les niveaux carbonatés du Grès à meules, p. 141
- XII Récapitulation des caractères des principaux faciès du Grès à meules : l'environnement deltaïque, p. 143
- XIII Composition minéralogique de quelques échantillons de grès à dalles. p. 150
- XIV Composition minéralogique des bancs carbonatés du Grès argileux et du Muschelsandstein.p. 158
- XV Liste et répartition des genres et espèces rencontrés dans les bancs carbonatés du Grès argileux. p. 159
- XVI Comparaison des caractères du Buntsandstein supérieur et du Muschelkalk inférieur dans le Nord des Vosges : l'histoire d'une transgression, p. 162
- XVII Comparaison de la fraction argileuse des différents faciès du Grès à Voltzia et du Muschelsandstein, p. 171
- XVIII Analyses chimiques de quelques illites du Grès à Voltzia, p. 171
- XIX Formules structurales de deux illites du Grès à Voltzia, p. 172
- XX Teneurs moyennes et intervalles de distribution de quelques éléments dans les illites du Grès à Voltzia et du Muschelsandstein, p. 173

TABLE DES MATIÈRES

Pages

SOMMAIRE	5
AVANT-PROPOS	7
INTRODUCTION	11

Première Partie

ÉTUDE PALÉONTOLOGIQUE DU GRÈS À VOLTZIA

INTRODUCTION	17
CHAPITRE 1 - LA FAUNE DU GRÈS À VOLTZIA	19
Embranchement des Rhizoflagellés	19
Embranchement des Coelentérés	22
Embranchement des Brachiopodes	22
Embranchement des Annélides	24
Embranchement des Mollusques	27
Classe des Lamellibranches	27
Classe des Gastéropodes	33
Embranchement des Arthropodes	35
Super-Classe des Chélicérates	35
Classe des Mérostomes	35
Classe des Arachnides	36
Super-Classe des Crustacés	38
Classe des Branchiopodes	38
Classe des Ostracodes	43
Classe des Euthycarcinidés	44
Classe des Malacostracés	46
Crustacés aux affinités incertaines (Halicynés)	55
Super-Classe des Myriapodes	57
Super-Classe des Hexapodes (Insectes)	58
Embranchement des Echinodermes	58
Embranchement des Vertébrés	60
Super-Classe des Poissons	60
Super-Classe des Tétrapodes	63
CHAPITRE 2 - LES TEMOINS DE L'ACTIVITE BIOLOGIQUE	65
I - Les pontes et les oeufs	65
1. Pontes rapportées à des Insectes	65
2. Pontes de Crustacés	67
3. Oeufs et pontes rapportés à des Poissons	67

Pages

II - Les coprolithes	68
III - Les traces d'activité animale (Lebensspuren)	68
 Les traces d'habitat Les traces de locomotion Les traces de nutrition 	69 71 73
CHAPITRE 3 - LA FLORE DU GRÈS À VOLTZIA	75
I - Inventaire palynologique	75
1. Les spores 2. Les pollens 3. Les Acritarches	75 76 76
II - Les appareils végétatifs	76
Embranchement des Cryptogames vasculaires Embranchement des Préphanérogames Embranchement des Phanérogames	76 77 77
III - Les organes reproducteurs	77
CONCLUSION À L'ÉTUDE PALÉONTOLOGIQUE	79
 La diversité des organismes Comparaison avec les faunes d'autres époques géologiques Faune naine ou population juvénile	79 79 80 80
5. La répartition stratigraphique des espèces	80

Deuxième Partie

ÉTUDE SÉDIMENTOLOGIQUE ET PALÉOÉCOLOGIQUE DU GRÈS À VOLTZIA	
INTRODUCTION	85
I - LIMITES ET SUBDIVISONS STRATIGRAPHIQUES DU GRÈS À VOLTZIA	87
I - Historique	87
II – Les limites du Grès à Voltzia	87
 La base du Grès à Voltzia La limite entre le Grès à meules et le Grès argileux La limite supérieure du Grès à Voltzia 	87 89 89
II - ÉTUDE SÉDIMENTOLOGIQUE ET PALÉOÉCOLOGIQUE	93
A - LE GRÈS À MEULES	93
CHAPITRE 1 - LES GRÈS SAINS	95
I - Description pétrographique	95
1. Granulométrie 2. Composition minéralogique 3. Composition chimique	95 97 98
II – Stratonomie	99
A. La stratification	99
B. Le litage	99
 Les lamines Les modifications du litage 	99 100

Pages

C. Les figures sédimentaires	102
1. Figures des semelles ou murs des bancs (sole-marks)	102
a) Figures en liaison avec les caractères physiques du niveau sous-	
jacent	102
c) Figures de déformation	103
d) Traces d'activité biologique	104
2. Figures observables à l'intérieur des bancs	104
3. Les figures du toit des bancs	105
a) Les rides sous-aquatiques ou ripple-marks	105
b) Les figures de tassement c) Les traces d'activité biologique	106
III – Caractères paléontologiques	107
IV - Interprétation du milieu de dépôt	107
1. Le cadre hydrodynamique	107
2. L'environnement sédimentaire	108
3. Le factes des barres d'embouchure	110
CHAPITRE 2 - LES GRÈS À PLANTES	111
I - Description pétrographique	111
1. Granulométrie	111
2. Composition minéralogique	$111 \\ 112$
II - Stratonomie	112
A. La stratification	112
B. Le litage	113
C. Les figures sédimentaires	113
III - Paléontologie	115
1. La flore	115 115
V - Interprétation du milieu de dépôt	115
CHAPITRE 3 - LES NIVEAUX ARGILEUX	117
I - Sédimentologie	117
A. Caractères stratonomiques	117
1. Mode de gisement	117
2. Les lamines	117
B. Caracteres petrographiques	119
1. La granulométrie	119
3. Composition chimique	120
II - Paléontologie	120
1. La diversité des organismes	120
2. Les associations d'organismes	120
III Daláchicoánoses à crustação et miliou de dépôt	194
m = rateonocenoses a crustaces et minet de depot	101
1. Le niveau argiteux n° 1 u'Adamswitter	124
a) Localisation et technique d'exploitation	$\frac{124}{124}$

Pages

	-
c) La succession des organismes	124 125
e) L'oxygénation du sédiment	125
f) Le cadre sédimentologique	125
g) Les renseignements fournis par l'étude géochimique	125
h) Appréciation du taux de sédimentation	126
2 Le niveau argileux de Bust	120
a) Decembric	120
b) Appréciation du taux de sédimentation	120
3. Caractères généraux des niveaux argileux à crustacés	128
4. Indications sur le milieu de dépôt fournies par les organismes	1 28
a) La salinité b) La bathymétrie	128 128
5. Le milieu de dépôt	129
IV - Paléobiocénoses à lingules et à lamellibranches et milieu de dépôt	129
1. Le niveau argileux à lingules et à lamellibranches de Hangviller	129
2. Caractères généraux des niveaux argileux à lingules et à lamellibranches	131
3. Indications sur le milieu de dépôt fournies par les organismes	131
	132
V - Les niveaux argileux a organismes terrestres	132
 Le niveau argileux n° 2 d'Adamswiller	132
3. Le milieu de dépôt	134
VI - Conclusion sur les niveaux argileux du Grès à meules	134
CHAPITRE 4 - LES NIVEAUX CARBONATES	137
I - Sédimentologie	137
1. Modes de gisement	137
3. Conclusion à l'étude sédimentologique	130
II - Paléontologie	140
1. La faune	140
Z. Les indications fournies par les organismes	140
III - Les milieux de dépôt	140
IV - Conclusion	142
LE PAYSAGE DU GRÈS À MEULES	143
1. L'environnement deltaïque	143
2. Les modalités de la sédimentation deltaïque	144
5. L'evolution pareogeographique du Gres à meules	145
B - LE GRÈS ARGILEUX	147
CHAPITRE 1 - LES GRÈS À DALLES	149
I - Caractères sédimentologiques	149
1. Stratonomie	149
2. Etude pétrographique	150
II - Caractères paléontologiques	151
1. La faune	151

Pages 2. Les traces de l'activité biologique 1513. Indications fournies par les organismes sur le milieu de dépôt 151III - Le milieu de dépôt 151 CHAPITRE 2 - LES BANCS ARGILEUX 153 I - Caractères sédimentologiques 1531. Stratonomie 153 2. Etude pétrographique 153 II - Caractères paléontologiques 154 III - Le milieu de dépôt 1541. Les conditions générales de l'environnement 154 2. Le paysage 154 CHAPITRE 3 - LES BANCS CARBONATÉS 157 I - Caractères sédimentologiques 1571. Stratonomie 157 2. Pétrographie 157 II - Caractères paléontologiques 158 III - Le milieu de dépôt 160 LE PAYSAGE DU GRÈS ARGILEUX ET LE PASSAGE AU MUSCHELKALK 161 1. Le régime marin 1612. Le passage de la sédimentation terrigène à la sédimentation carbonatée 161 162 3. Le problème stratigraphique de la limite Buntsandstein - Muschelkalk 4. Le passage de la plaine de piémont aux plages marines 163 C - ÉTUDE DES PALÉOCOURANTS 165 I - Méthodes de mesure 165 II - Résultats 165 III - Conclusion 167D - LES ARGILES DU GRÈS À VOLTZIA ÉTUDE MINÉRALOGIQUE ET GÉOCHIMIQUE 169 169 I - Etude des minéraux argileux 1. Distribution des minéraux argileux dans les faciès du Grès à Voltzia ... 169 2. Manière d'être des illites 169 3. Interprétation 170 170 II - Caractères géochimiques des minéraux argileux 170 1. Les illites 2. Teneurs moyennes de quelques éléments dans les différents faciès 172172 a) Présentation des analyses chimiques 1723. Les variations géochimiques dans les faciès argileux 172172a) Les variations à l'échelle du niveau argileux b) Les variations à l'échelle du Grès à Voltzia 175 c) Le bore, indicateur de la paléosalinité 175 177 III - Conclusion

Troisième Partie

CONCLUSIONS SUR LES PAYSAGES ET LES ÉVOLUTIONS GÉOCHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DU GRÈS À VOLTZIA. LE MONDE VIVANT À L'ÉPOQUE DU BUNTSANDSTEIN SUPÉRIEUR	Pages
I - Les paysages et la vie dans l'environnement delta ${f ilde r}$ que du Grès à meules .	181
 La sédimentation deltaïque Les chenaux Le paysage à flaques et son peuplement Les dépôts littoraux 	181 181 182 182
II - La transgression de la mer du Muschelkalk	183
 Les plages marines du Grès argileux Le Grès coquillier et la limite Buntsandstein-Muschelkalk Le relais de la sédimentation deltaïque par la sédimentation marine La place du Grès à Voltzia dans la stratigraphie du Trias 	183 183 184 184
III - Les évolutions géochimiques et biologiques à travers le temps et l'espace.	185
 Les variations géochimiques dans l'espace Les variations géochimiques verticales	185 185 186 186 187
IV - L'image du monde vivant à l'époque du Buntsandstein supérieur	188
 Le tableau paléobiologique Les données paléontologiques nouvelles	188 188 188 189
Summary	191
Zusammenfassung	195
Bibliographie	199
Planches hors-texte	219
Index paléontologique	293
Annexe I - Liste des carrières étudiées et localisation des principaux gisements fos- silifères	295
Annexe II - Coupes détaillées des principales carrières de Grès à Voltzia	301
Liste des figures	309
Liste des tableaux	311
Table des matières	313