

DIAGENÈSE PRECOCE ET ENVIRONNEMENTS DIAGENETIQUES (d'après Purser, 1973)

L'existence de divers phénomènes diagénétiques syn-sédimentaires comme la lithification est bien établie. Néanmoins, le rapport entre ces phénomènes et le milieu sédimentaire dans lequel ils se produisent est moins connu et on peut se demander si ce rapport est aussi étroit que celui existant entre le milieu et certains caractères initiaux des sédiments (composition, structure, faune et flore, etc.)

En termes de diagenèse, on peut définir trois environnements fondamentaux: les milieux infratidal, inter- et supratidal, continental.

Les facteurs les plus importants dans la diagenèse syn-sédimentaire de ces trois milieux sont d'une part, la composition de l'eau: eau de mer dans les zones tidales; eau météorique en milieu continental et d'autre part le contact ou non du sédiment directement avec l'air. Ce dernier facteur nous permet de subdiviser les milieux diagénétiques en deux zones: zone phréatique toujours noyée et zone vadose au-dessus du plan d'eau. Ces deux variables simples sont liées aux trois milieux sédimentaires, l'ensemble de ces rapports étant exprimés Fig. II.4A.

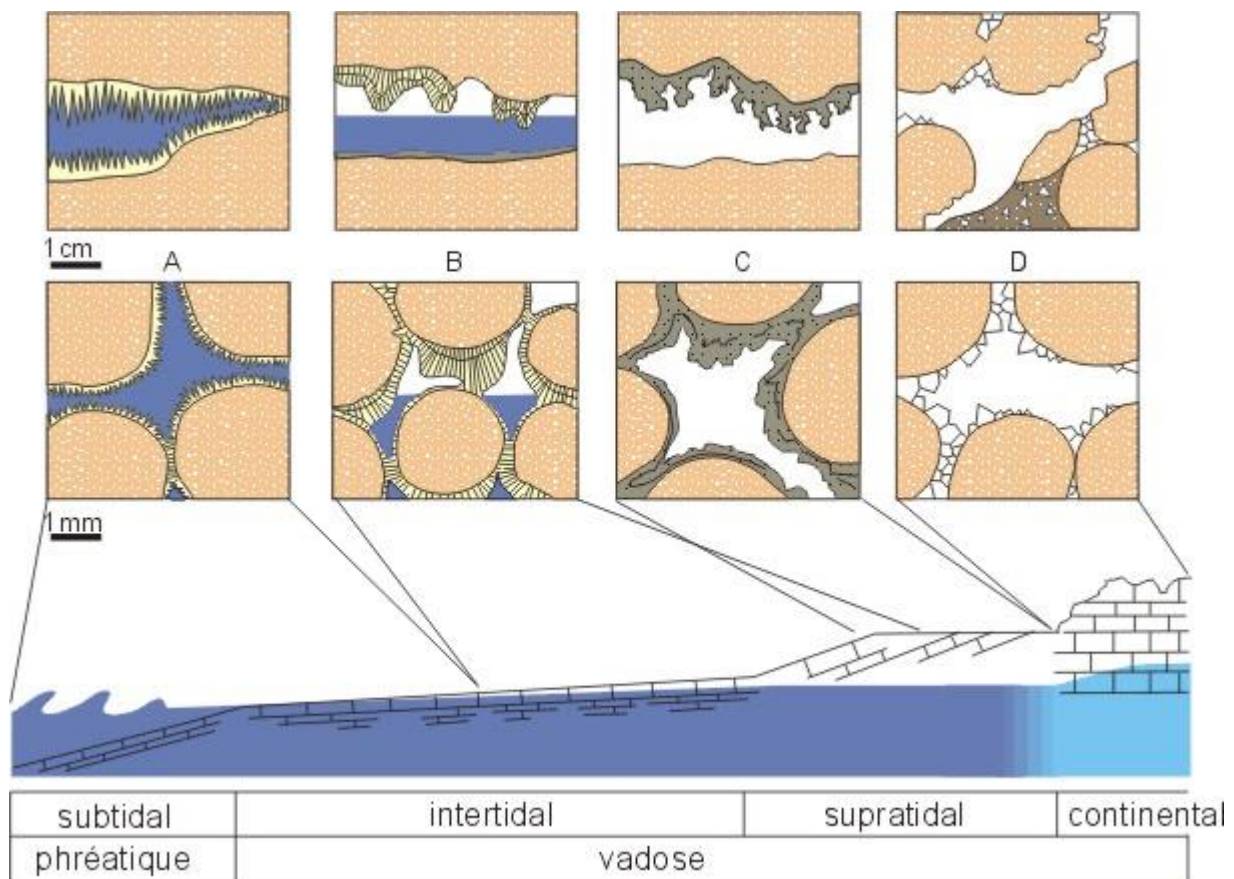


Figure II.4 A: profil schématique localisant les types de ciments précoces et leur environnement de formation. A: subtidal (=zone phréatique marine): ciment aragonitique fibreux à disposition régulière; B: intertidal (=zone vadose marine): ciment aragonitique fibreux à tendance microstalactitique; C: supratidal (=zone vadose marine): aragonite micristalactitique, associée à des particules à la partie supérieure des cavités; D: continental (=zone vadose météorique): calcite sparitique non magnésienne et silt vadose.

Milieu infratidal (sous-marin)

Ce milieu, par définition, est toujours sous l'eau et le sédiment est en contact soit avec l'eau de mer, soit avec des solutions interstitielles marines de composition variable pouvant entraîner des dissolutions ou des précipitations. Le phénomène de dissolution des particules carbonatées est surtout associé à la profondeur en fonction de la baisse de température et de l'augmentation de la pression partielle de CO_2 , facteurs qui tendent à augmenter la solubilité de la phase carbonatée. Démontrée de façon convaincante par des expériences, la dissolution de la calcite est plus ou moins rapide au-dessous de 3500 m environ de

profondeur. La lysocline est maintenant si classiquement connue qu'on risque d'interpréter des phénomènes similaires dans des séries anciennes uniquement en termes de grande paléoprofondeur.

Or, la dissolution partielle ou complète est également active dans certains milieux peu profonds. Les eaux froides et sous-saturées en carbonates de la Mer Baltique favorisent une dissolution sélective des tests et débris bioclastiques: certains éléments cristallins de la structure cellulaire des mollusques et des échinodermes sont dissous préférentiellement, ce qui donne un aspect micritisé à la particule. D'autre part, même en environnement de plate-forme tropicale, des études récentes ont montré la présence de processus de dissolution des carbonates, par acidification de la tranche supérieure des sédiments. Cette acidification serait liée à la réduction bactérienne des sulfates ($\text{SO}_4^{2-} + 2 \text{CH}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{S}$). Il faut noter que cette acidification ne se manifeste que dans certaines conditions de concentration de SO_4^{2-} , d'autres niveaux de concentration peuvent au contraire protéger les carbonates en enrichissant les solutions interstitielles en HCO_3^- (Perry & Taylor, 2006).

Le phénomène de précipitation sous forme de ciment cristallin est bien établi pour le milieu infratidal mais son importance comme mécanisme de lithification est encore discutée. Le développement de cristaux d'aragonite et de calcite magnésienne dans les sédiments actuels, bien que plus fréquents dans certains milieux néritiques (Bahamas, Golfe Persique, Bermudes, ride médio-atlantique, etc.), se manifeste jusqu'à 1500 m de profondeur dans la Mer Rouge.

Parmi les nombreux exemples de lithification en milieu sous-marin, celui du Golfe Persique semble le plus important en étendue. Dans ce bassin plus ou moins confiné, le phénomène est très répandu dans les sédiments de texture sableuse situés en environnement modérément agité, tels certaines lagunes et, plus au large, à 20-30m de fond, près du niveau inférieur d'action de la houle. Le phénomène semble absent dans les boues de la plaine centrale et également dans les milieux littoraux très agités. L'existence de phénomènes comparables aux Bahamas et aux Bermudes dans des milieux plus ou moins océaniques est la preuve que la lithification sous-marine n'est pas un processus étroitement lié au degré de confinement.

Les produits de cette lithification syn-sédimentaire en milieu infratidal comprennent d'abord, à petite échelle, les graviers de type agrégat ou "lump" puis, à l'échelle régionale, les croûtes. Ces dernières, très développées dans le Golfe Persique, surtout dans presque toutes les lagunes à fond sableux (sable carbonaté) mesurent jusqu'à un mètre d'épaisseur. Le degré de durcissement atteint son maximum à la surface et diminue progressivement vers les sédiments meubles du dessous. Les surfaces durcies, parfois superposées, sont perforées et encroûtées d'une manière tout-à-fait comparable aux "hard-grounds" anciens.

Les études d'atolls du Pacifique et de récifs des Bermudes ont montré que le développement d'un ciment secondaire joue aussi un rôle fondamental dans la stabilisation de la masse récifale. La nature de ces ciments marins est variable: soit aragonitique, soit de calcite magnésienne. Diverses morphologies cristallines sont connues (Figs. II.5, II.7A, B, C) parmi lesquelles les formes fibreuses dominent. Les cristaux de calcite magnésienne de très petite dimension qui, en lame mince, donnent une structure micritique se révèlent être, au microscope électronique, des rhomboèdres de 1 à 5 μm (Fig. II.7A).

Les aspects essentiels de cette lithification précoce en milieu sous-marin sont donc les suivants:

- surfaces durcies et perforées, parfois superposées;
- ciment surtout fibreux ou micritique (Fig. II.5B, C & D);
- répartition de ces ciments: plus développés près de la surface durcie et surtout répartis d'une façon régulière autour des vides inter- ou intragranulaires (Fig. II.4A);
- composition: aragonite ou calcite magnésienne (recristallisée en calcite non magnésienne dans les calcaires anciens, voir ci-dessous).

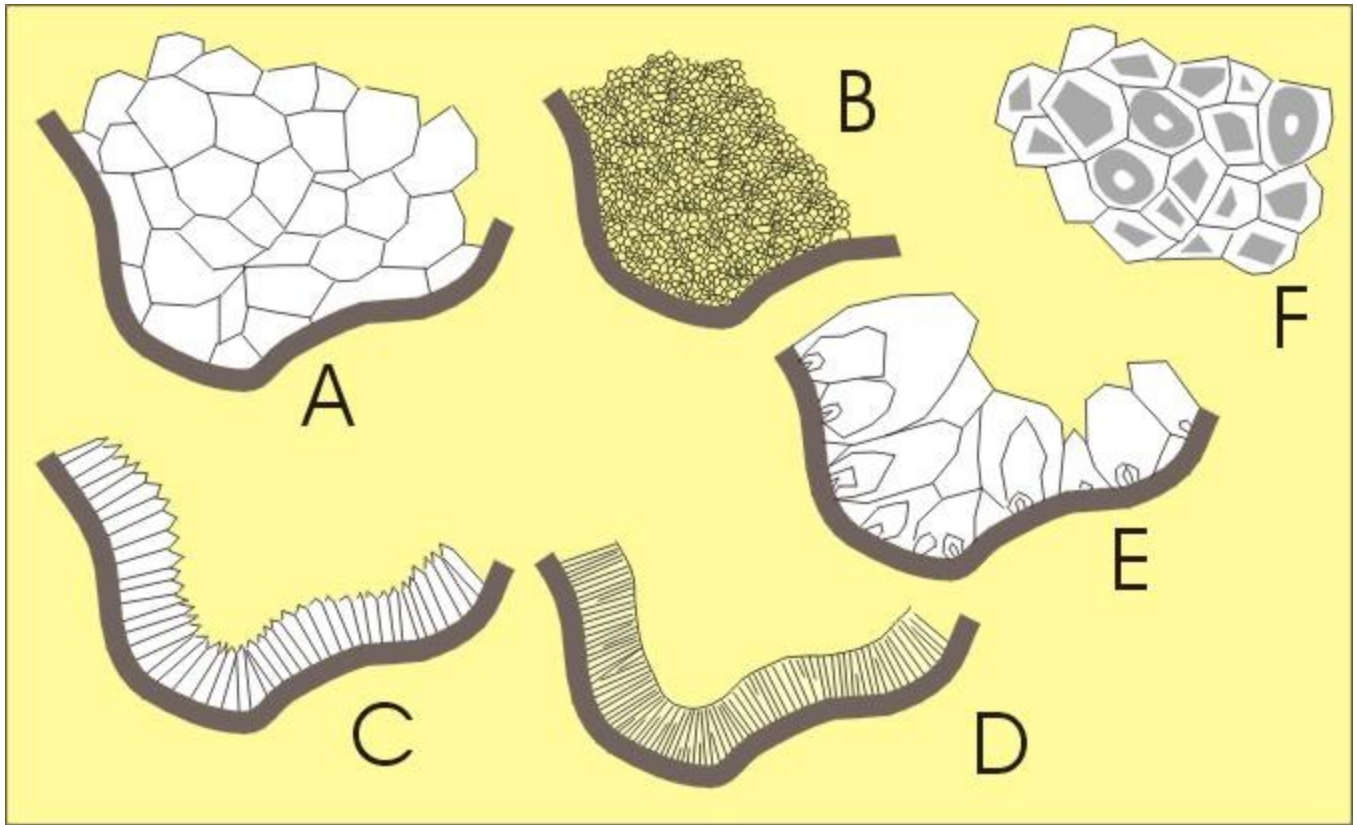
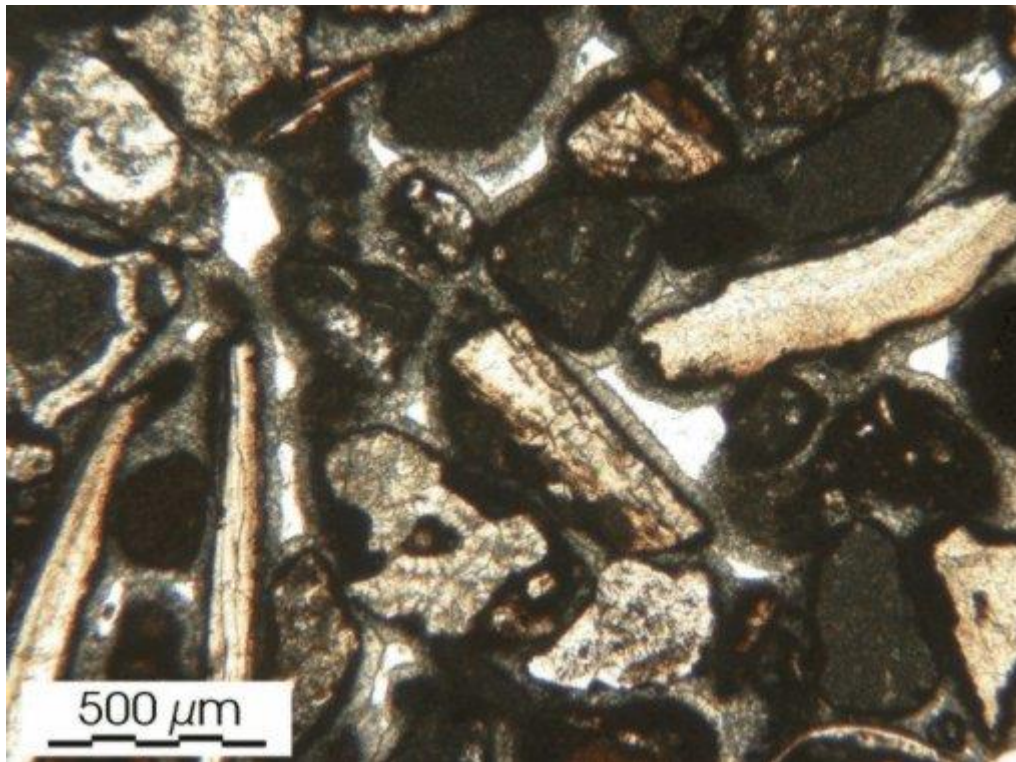


Figure II.5: Différents types morphologiques de ciments. A: sparite équigranulaire (tous les cristaux ont la même taille). B: microspar équigranulaire (il pourrait s'agir soit de ciment, soit d'une matrice ayant subi un néomorphisme, cf. ci-dessous). C: sparite en lames formant une frange isopaque sur le bord d'une cavité. D: sparite fibreuse, également en frange isopaque. E: sparite drusique (les premiers cristaux sont petits, ensuite leur taille croît au cours du temps vers le centre de la cavité). F: ciment sparitique syntaxique ou coaxial sur des plaques d'échinodermes.



Grainstone lithoclastique et bioclastique. La cimentation consiste en une frange fibreuse de 60 μm , en croûte isopaque. C'est une diagenèse précoce en zone phréatique marine.



Gros-plan sur le ciment fibreux de la lame précédente.

Milieus inter- et supratidal

Dans la zone de battement des marées, les facteurs diagénétiques sont voisins de ceux du milieu sous-marin, au moins en ce qui concerne l'eau. Néanmoins, l'émersion du littoral implique le contact du sédiment avec l'air et l'existence d'un plan d'eau qui fluctue avec les marées. De plus, l'émersion entraîne l'augmentation de la température des eaux interstitielles et en même temps peut provoquer leur évaporation. Ces facteurs physiques donnent un caractère particulier à la diagenèse.

Les phénomènes de dissolution semblent surtout liés à la présence de végétaux, leurs processus métaboliques modifiant le substrat à l'échelle millimétrique. La dissolution à plus grande échelle, présente dans les régions humides, semble être peu étudiée.

Que l'émersion soit surtout favorable à la lithification est démontré par la formation de "beach-rock" (grès de plage), surtout en climats relativement chauds. Même si le littoral est plus accessible (et en conséquence plus étudié) que les milieux infratidaux, il est néanmoins probable que la précipitation de ciment dans la zone intertidale est plus fréquente et intense que dans les milieux submergés.

Le "beach-rock" se développe mieux le long des littoraux à agitation modérée; il est rare sur les plages constamment balayées par les vagues et également rare dans les milieux intertidaux à sédiments boueux. Cette cimentation donne lieu à des croûtes indurées en surface, sous lesquelles s'observe le sédiment meuble. La croûte est souvent plus épaisse près de la limite supérieure des marées, c'est-à-dire dans la zone qui se trouve le plus souvent au-dessus du plan d'eau. Parfois en minces pellicules ou en forme de manchons autour des terriers, la lithification atteint une épaisseur d'un mètre environ sur certaines îles du Golfe Persique. La présence de sédiment non lithifié au-dessous du "beach-rock" en favorise la désintégration soit par des processus d'affouillement biologique ou mécanique, soit par des forces diagénétiques encore peu connues. On constate en effet dans certains cas une augmentation de surface de la croûte (peut-être en liaison avec les forces de cristallisation du ciment), ce qui la déforme en donnant de petits anticlinaux ou micro-chevauchements de l'ordre du décimètre appelés "teepee". Cette désintégration crée souvent des plaquettes de calcaire qui s'accumulent localement le long du littoral sous forme de brèche sédimentaire.

Comme la composition des eaux à partir desquelles le ciment du "beach-rock" précipite est très proche de celle des milieux infratidaux, il n'est pas surprenant que la minéralogie et la morphologie des cristaux dans les "beach rocks" et dans les calcaires cimentés en milieu sous-marin soient similaires. Les nombreuses études de "beach rock" ont montré la présence soit d'aragonite, soit de calcite magnésienne fibreuse ou micritique.

Le caractère essentiel de ce ciment inter- et supratidal concerne sa répartition à l'échelle du pore. Si le ciment formé en milieu infratidal est réparti d'une façon régulière, celui de la zone intertidale (et plus particulièrement de sa partie supérieure) ne l'est généralement pas, (Figs. II.4A, II.6, II.7H). Cette disposition irrégulière du ciment dans la zone de battement des marées est liée à la présence de l'air dans ce milieu vadose et, par conséquent, à la répartition irrégulière de l'eau à partir de laquelle précipite le ciment. Ces irrégularités fréquentes dans les "beach-rocks" du Golfe Persique, se manifestent à trois échelles:

- à petite échelle: l'eau qui s'accumule aux points de contact entre les particules sous forme de ménisque tend à précipiter un ciment très localisé dont les limites épousent le ménisque; il a d'ailleurs été appelé "meniscus cement" par Dunham;

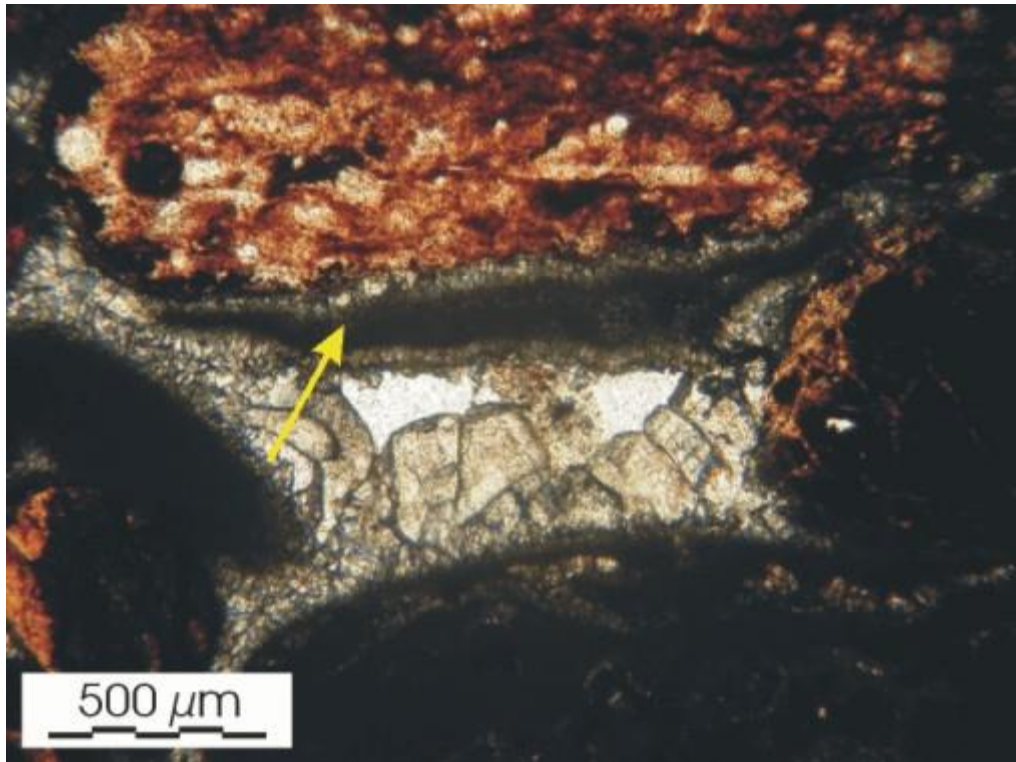
- lorsqu'il s'agit d'un sédiment relativement grossier (sable grossier ou gravier), l'eau tend à s'accumuler non seulement aux points de contact des grains mais aussi sous les surfaces inférieures des particules. Ceci donne naissance à un "ciment microstalactitique" (Figs. II.6, II.7H).

- A plus grande échelle, dans les vides centi- ou décimétriques, le ciment se forme en stalactite sur le plafond de la micro-caverne. Ces cavités se localisent surtout sous les dalles de "beach-rock" où elles sont créées par la déformation en "teepee" ou par l'excavation du sédiment meuble sous-jacent. Ces stalactites marines qui atteignent plusieurs millimètres de long existent sous deux formes. La plus fréquente en zone intertidale est composée de cristaux d'aragonite fibreuse. Dans la zone supratidale, ces micro-stalactites sont composés de sédiment comportant surtout des pelotes fécales durcies et des foraminifères plaqués contre le toit. Cette disposition curieuse s'explique par le fait que les particules sèches flottent, puis se collent contre le plafond lorsque le plan d'eau (ou la marée) monte; elles sont ensuite soudées en grappes par une précipitation de ciment.

En somme, la distinction souvent difficile entre les "beach-rocks" et les calcaires cimentés en milieu sous-marin se résume ainsi: (1) répartition irrégulière du ciment en forme de ménisques ou de microstalactites; (2) présence de brèche sédimentaire fréquente le long du littoral mais plus rare en milieu infratidal; (3) surfaces durcies irrégulières à l'échelle millimétrique (irrégularités dues à l'attaque algale) mais avec des macro-perforations souvent moins nombreuses que sur les surfaces durcies en milieu sous-marin.



Beach rock en milieu intertidal (Australie). A: vue générale. B: détail montrant l'incorporation de coquilles et de fragments de grès (flèche).



Ciment vadose marin microstalactitique (flèche) (alternance de micrite et de fibres trapues) dans un grainstone cénozoïque du Golfe Persique. Après cet épisode de cimentation, correspondant à la formation d'un beach rock, la lithification s'est poursuivie en milieu continental par la précipitation d'une calcite sparitique drusique.

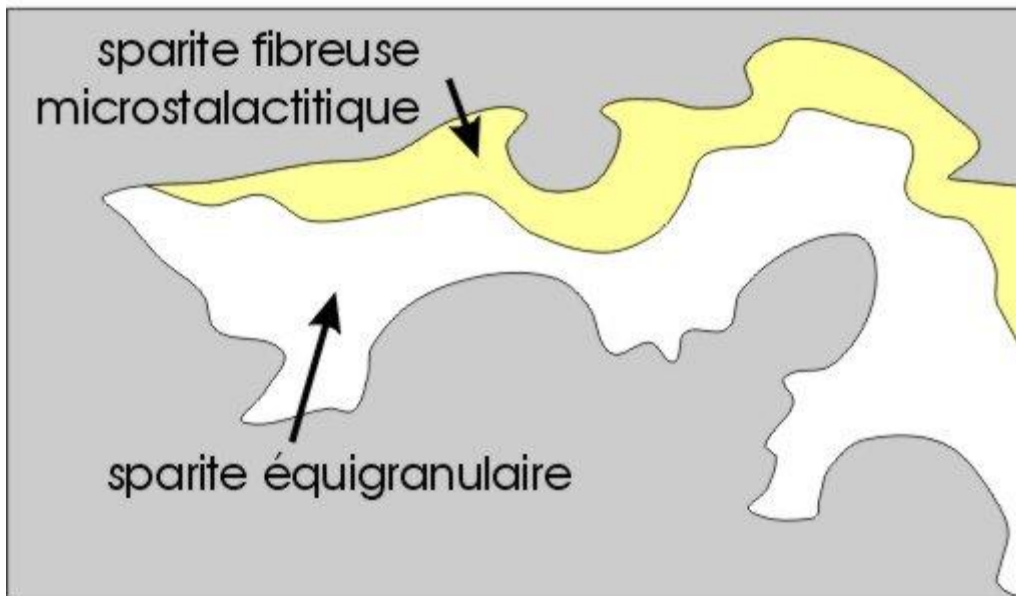
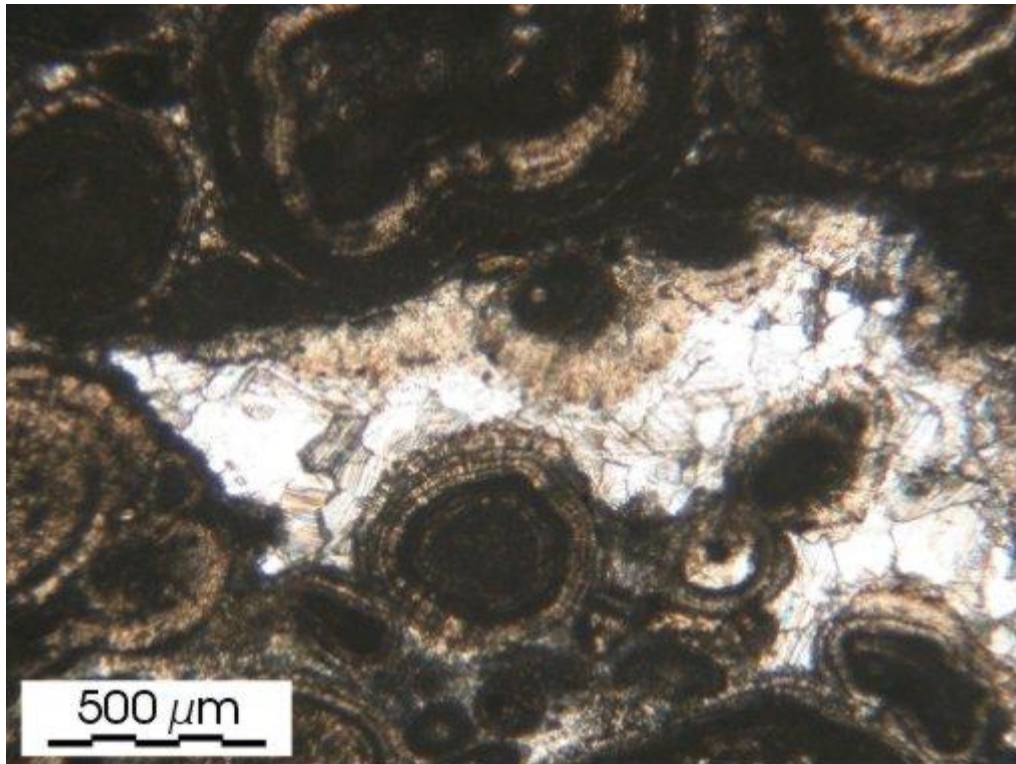


Fig. II.6: ciment vadose dans un calcaire à oïdes de la Formation de Terwagne (Dinantien), Emptinne et schéma interprétatif.

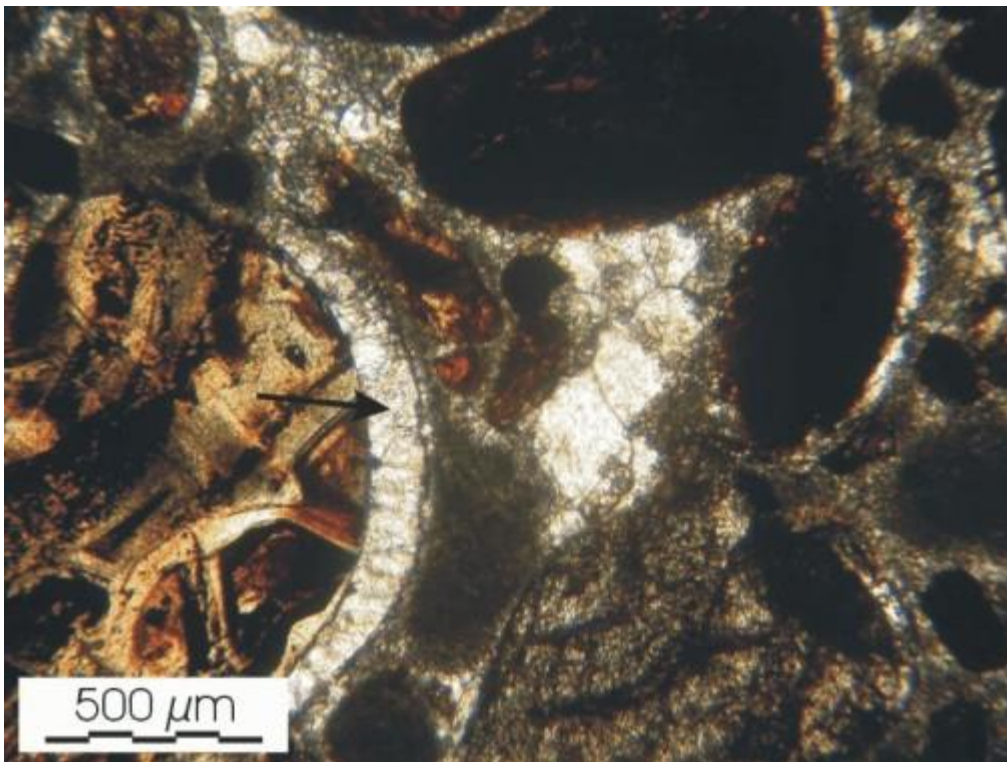
Milieu continental

En milieu continental, les processus diagénetiques affectent particulièrement les sédiments holocènes dans les régions où la plaine côtière est bien développée grâce à un accroissement latéral actuel rapide. Ceci est le cas le long de la côte ouest de l'île d'Andros, de la côte d'Abu Dhabi (Golfe Persique) et en bien d'autres lieux. Dans ces régions, les sédiments déposés au départ en milieu littoral sont ensuite cimentés hors de l'influence marine, générant une croûte (caliche) sous laquelle s'observe un sédiment meuble; la transition, au moins à Abu Dhabi, coïncide souvent avec le plan d'eau. De plus, la diagenèse continentale affecte surtout des calcaires pléistocènes un peu partout dans le monde. En somme, on peut considérer que la diagenèse continentale fait partie de la diagenèse précoce, même si elle n'est pas tout-à-fait syn-sédimentaire.

Les processus et les effets de la diagenèse continentale sont bien établis grâce surtout aux études des calcaires pléistocènes des îles Bermudes, de la Barbade, des Bahamas et de la Jamaïque. Les travaux de Friedman (1964) et d'autres démontrent l'instabilité des sédiments carbonatés marins une fois placés sous l'influence des eaux météoriques. La dissolution affecte l'aragonite et la calcite magnésienne. Cette dernière garde généralement sa morphologie même en perdant son magnésium. On assiste donc à la dissolution de particules entières à un degré nettement plus grand que dans les milieux marins.

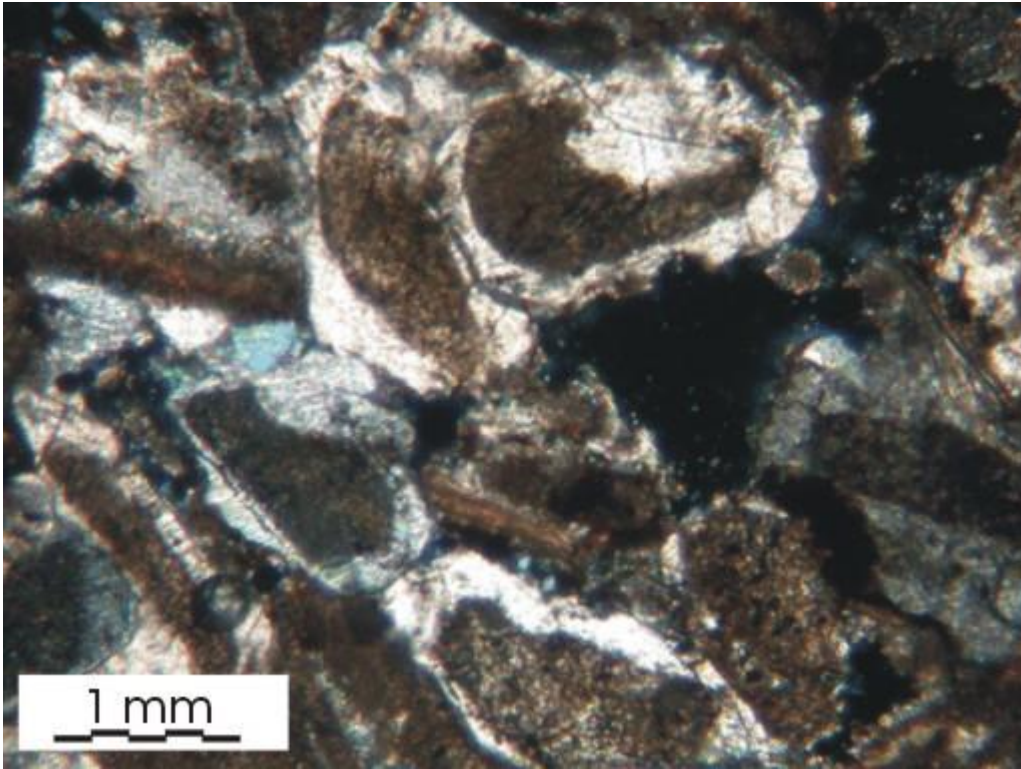
Le phénomène de dissolution s'associe étroitement à la reprécipitation à proximité du carbonate à cause de la saturation très rapide des eaux météoriques. Cette reprécipitation de calcite non magnésienne donne naissance aux cristaux sparitiques bien connus, de morphologies variées parmi lesquelles la forme trapue à axe c orienté normalement au substrat ("drusy mosaïque") est la plus fréquente (Fig. II.5E). Dans certains cas, on peut observer une croissance syntaxique (=coaxiale) du ciment sparitique sur des bioclastes, fréquemment des échinodermes (Fig. II.5F). Les cristaux aciculaires typiques des milieux marins sont rares. L'ensemble des processus de dissolution et de reprécipitation s'associe à une tendance négative dans les rapports isotopiques $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ et $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ (voir ci-dessous).

En plus des phénomènes de dissolution et de reprécipitation en calcite sparitique, le milieu continental vadose est caractérisé par une cimentation irrégulière. Similaire mais plus répandue que dans les milieux littoraux, "le ciment en ménisque" est presque toujours présent.



Ciment vadosé météorique microstalactitique (flèche) dans un grainstone cénozoïque du Golfe Persique.

Le "silt vadosé" défini par Dunham (1969) dans les séries paléozoïques du Nouveau-Mexique existe peut-être dans les calcaires quaternaires bien que sa présence ne semble pas encore signalée. Les eaux météoriques, selon Dunham, jouent non seulement un rôle de dissolution mais peuvent transporter des débris fins (surtout de la taille des silts) à travers la zone vadose pour ensuite les déposer sous forme de sédiment géopète.



Ciment syntaxique autour de crinoïdes. Dom-le-Mesnil, Bajocien, France.

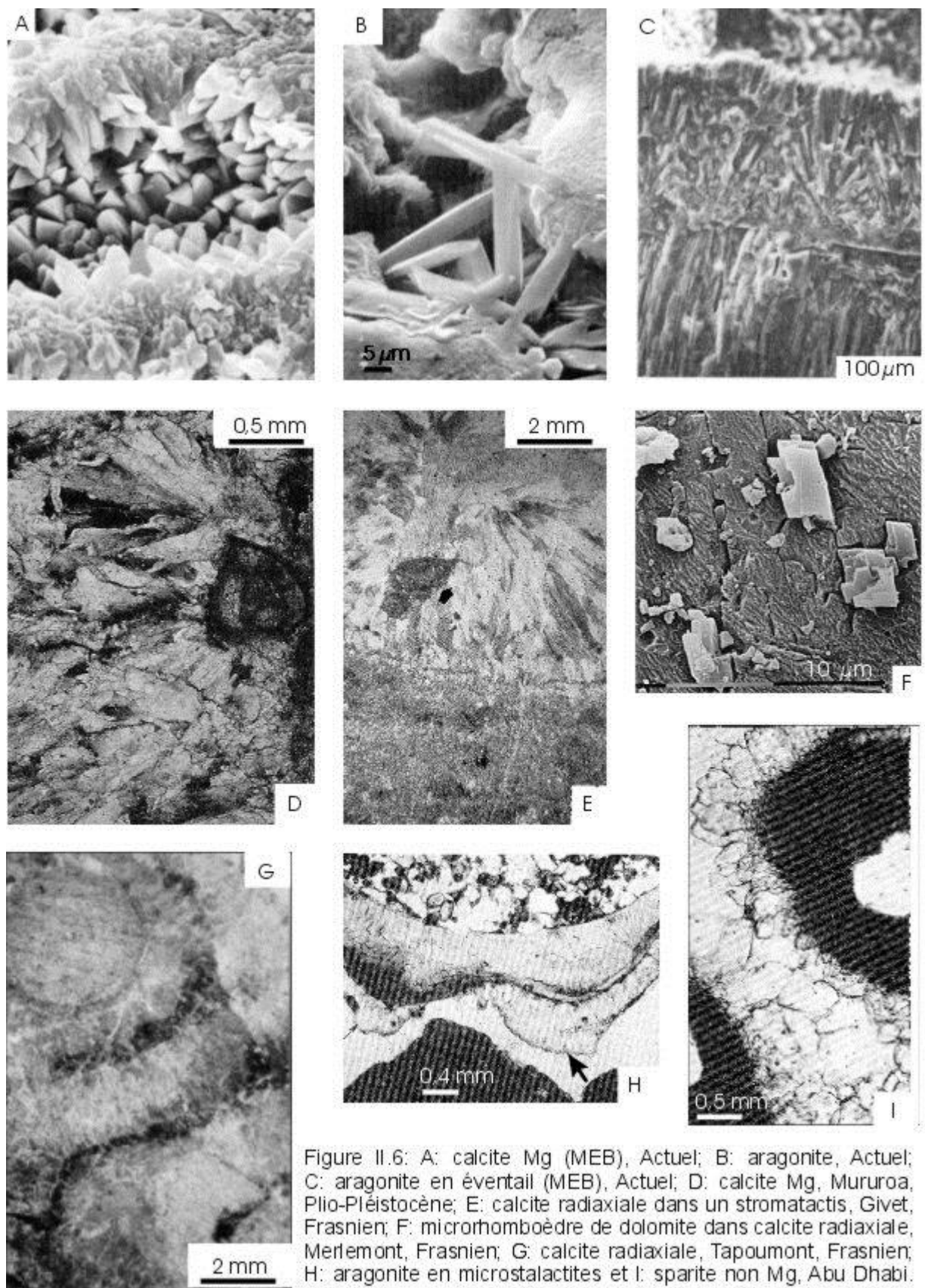


Figure II.6: A: calcite Mg (MEB), Actuel; B: aragonite, Actuel; C: aragonite en éventail (MEB), Actuel; D: calcite Mg, Mururoa, Plio-Pléistocène; E: calcite radiale dans un stromatolite, Givet, Frasnien; F: micro-rhomboèdre de dolomite dans calcite radiale, Merlemont, Frasnien; G: calcite radiale, Tapoumont, Frasnien; H: aragonite en microstalactites et I: sparite non Mg, Abu Dhabi.

Fig. II.7.

Utilisation des critères diagénétiques précoces dans l'interprétation des paléomilieus

Bien que seuls les aspects pétrographiques soient esquissés, il est néanmoins évident qu'il existe, au moins dans les sédiments holocènes, un rapport entre le milieu sédimentaire et les produits diagénétiques de ce milieu (Fig. II.4A). Autrement dit, on peut dans certains cas employer ces critères diagénétiques précoces pour interpréter des paléomilieus, au moins en termes simples. De ce fait, s'il existe à un moment donné un rapport entre le milieu et les propriétés sédimentaires et diagénétiques, on peut se demander si une évolution transgressive ou régressive à un endroit donné s'exprime systématiquement en termes diagénétiques. Ces séquences transgressives ou régressives (submersion ou émergence) peuvent d'un point de vue diagénétique s'exprimer théoriquement de trois façons :

- une séquence verticale de bancs ayant chacun un aspect diagénétique différent mais homogène;
- pour un banc donné, une microséquence, dans un même volume, de ciments différents qui reflètent des changements dans la nature et la composition des solutions interstitielles, c'est-à-dire une microséquence qui traduit une évolution progressive du milieu diagénétique lui-même par suite de l'évolution du bassin (transgression ou régression);
- un mélange intime de ces deux échelles.

Land (1970) démontre à plusieurs échelles une cimentation régressive dans les calcaires pléistocènes des Bermudes où une première phase de cimentation intertidale ("beach-rock") est suivie d'une deuxième phase sparitique continentale. Le seul exemple publié semble-t-il d'une séquence diagénétique transgressive, est donné par James (1972, in Purser) qui décrit dans les falaises de Bermude une calcite sparitique fossile suivie d'une phase de calcite magnésienne micritique. Cette dernière phase semble se former actuellement dans la zone des embruns.

Ces divers rapports entre le milieu sédimentaire et les ciments diagénétiques mis en évidence dans les systèmes quaternaires se retrouvent également dans les séries plus anciennes: un exemple éclatant est fourni dans le Bassin de Paris par les calcaires bathoniens de Bourgogne (cf. Purser). En effet, il existe dans la formation dite "Comblanchien" non seulement la preuve d'émergence en termes sédimentaire et diagénétique, mais aussi des séquences diagénétiques de style "régressifs". A Prémeaux (10 km au N de Beaune) et à Buffon (6 km au NW de Montbard), deux séquences de cimentation régressive légèrement différentes traduisent un épisode d'émergence bathonienne. Les deux exemples s'expriment aussi bien à l'échelle intergranulaire qu'à l'échelle des bancs à cimentations différentes mais homogènes.

La séquence régressive de Prémeaux (Fig. II.8) commence à la base (B) par un ciment fibreux réparti d'une façon régulière autour des particules. Plus haut (C) cette cimentation devient micro-stalactitique de type "beach-rock" puis la séquence se termine (E) par une surface d'érosion qui tronque un ciment sparitique, localement remanié et déposé quelques centimètres plus bas (D) sous forme de "silt vadose" géopète. Cette séquence de ciments semble traduire une émergence progressive d'abord en zone intertidale ("beach-rock") puis dans un milieu hors de l'influence marine (sparite précoce et "silt vadose").

En conclusion, la nature de la diagenèse précoce, ainsi que sa répartition tant à l'échelle du pore qu'au niveau d'une succession de bancs, peut nous aider à mieux comprendre l'évolution d'un bassin sédimentaire ancien.

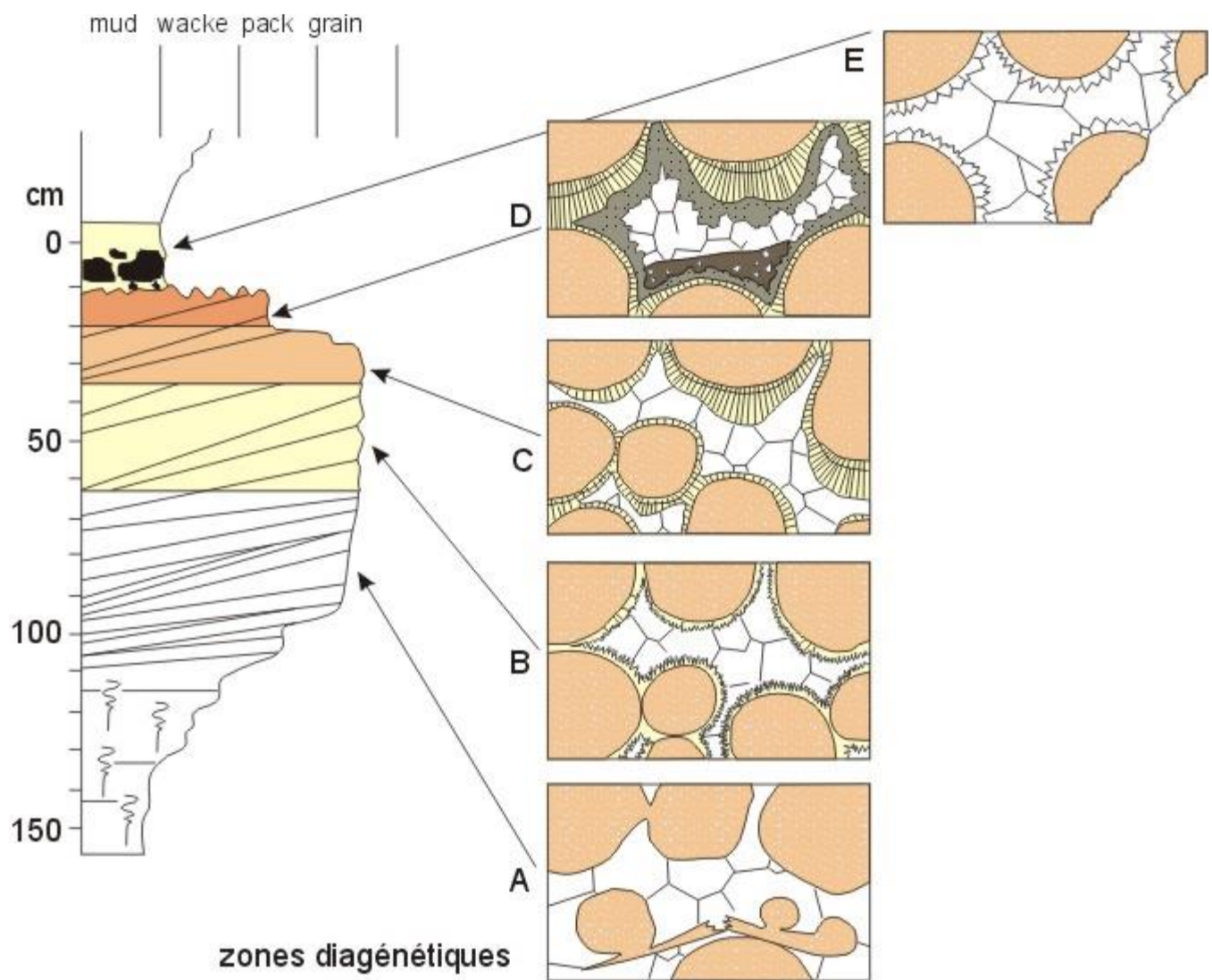


Fig. II.8: séquence à cimentation régressive à Prémieux (explications, voir texte). D'après Purser, 1973, modifié.