

Sommaire du cours de Paléontologie.

Partie 1 : Les Cours.

Chapitre 1 : **Fossiles et monde vivant.**
Page 1.

Chapitre 2 : **Histoire générale de la biosphère.**
Page 8.

Chapitre 3 : **Les grandes crises biologiques.**
Page 18.

Chapitre 4 : **Principales phases d'évolution des céphalopodes.**
Page 24.

Chapitre 5 : **Exemples d'évolution intra et transpécifique, la Microévolution.**
Page 32.

Chapitre 6 : **Modalités de la spéciation.**
Page 42.

Chapitre 7 : **Les processus ontogénétiques dans l'évolution.**
Page 47.

Chapitre 8 : **Synthèse : Evolution et Milieu.**
Page 56.

Partie 2 : Les Travaux Pratiques.

TP1 : **Paléontologie, introduction.**
Page 59.

TP2 : **Evolution phylogénique du développement des caractères.**
Page 61.

TP3 : **Les Foraminifères.**
Page 63.

TP4 : **Les Spongiaires.**
Page 66.

TP5 : **Les Cœlentérés.**
Page 68.

TP6 : **Les Brachiopodes.**
Page 71.

TP7 : **Les Mollusques.**
Page 73.

TP8 : **Les Arthropodes.**
Page 82.

TP9 : **Les Echinodermes.**
Page 85.

TP10 : **Les Végétaux.**
Page 89.

Fossiles et monde vivant.

I\ Définition de la paléontologie.

La paléontologie est la science qui étudie les êtres ayant vécu autrefois et dont les fossiles sont conservés dans les sédiments.

II\ Les fossiles.

A\ Les restes.

Ce sont les restes des animaux morts et, exceptionnellement, les corps en totalité. Généralement, on a uniquement les parties dures (coquilles, valves, carapaces, tests, squelettes, os, dents). Parfois, on peut avoir des moulages de l'ensemble de l'animal (moules internes, externes ou les deux à la fois).

B\ Les traces.

Les traces représentent l'activité biologique (déplacement, piste, empreinte, terrier). On peut trouver des perforations dues à la nutrition (cas des éponges et des gastéropodes). Parfois, ce sont des perforations du calcaire. On peut aussi trouver des traces d'excréments (des coprolithes).

III\ La fossilisation.

A\ Condition de la fossilisation.

La fossilisation est un phénomène exceptionnel qui nécessite des conditions très favorables.

Pour qu'il y ait fossilisation, il faut que le corps soit à l'abri des prédateurs, des bactéries aérobies (des processus d'oxydation).

Les milieux les plus propices sont les sédiments à granulométrie fine. Les meilleurs sédiments sont les boues calcaires et argileuses mais aussi, les cendres volcaniques. En général, les milieux de fossilisation sont marins. Les milieux terrestres sont peu propices.

B\ Evolution après la mort.

Insérer figure1

Après la mort, les parties molles se décomposent. De même pour la trame organique qui est associée aux parties minéralisées. En conséquences, les parties dures deviennent poreuses et cassantes. Elles peuvent suivre trois évolutions distinctes :

- Conservation sans modifications importantes. C'est un cas exceptionnel.

- Dissolution complète (cas le plus fréquent). Il peut rester des moules internes ou externes de l'animal.
- Remplacement du minéral initial par un autre minéral → c'est l'épigénie (ou pseudomorphose). Le plus souvent, on trouve :
 - La calcite : elle est rare dans la coquille des animaux. Elle n'est quasiment que chez les échinodermes et brachiopodes. Chez les autres animaux, on a de l'aragonite. Ce dernier minéral est instable et, à l'état fossile, elle donnera de la calcite.
 - La calcédoine (SiO_2) : elle entraîne la silicification des végétaux et des coquilles d'invertébrés.
 - La pyrite (FeS_2) : elle a une couleur jaunâtre.
 - L'apatite (phosphate de calcium) : ce minéral intervient dans le cas des os et des dents.

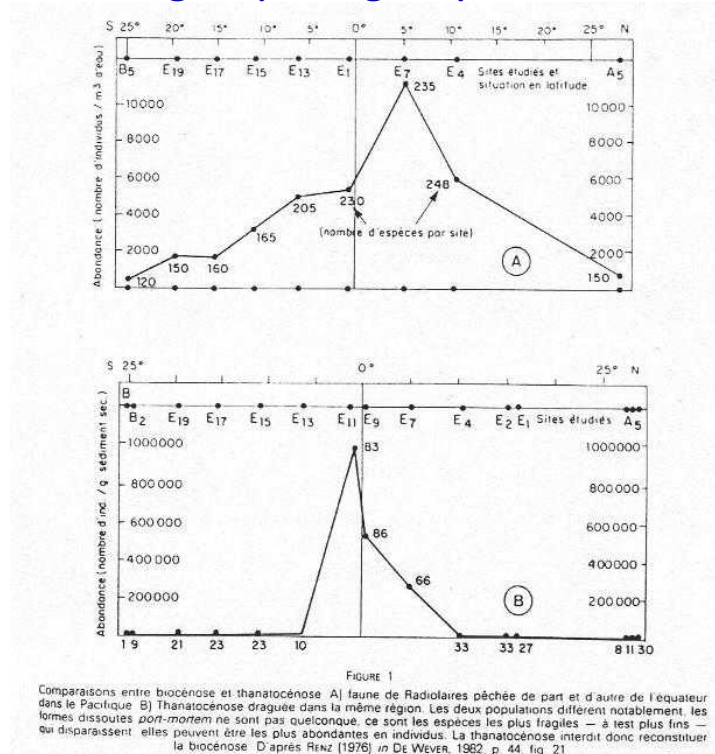
IV\ Monde vivant et peuplements fossiles.

La fossilisation nécessite trois types de conditions favorables :

- Existence de parties dures dans l'organisme.
- Aptitude de ces parties dures à être conservées par l'épigénie.
- Conditions des milieux favorables à la fossilisation.

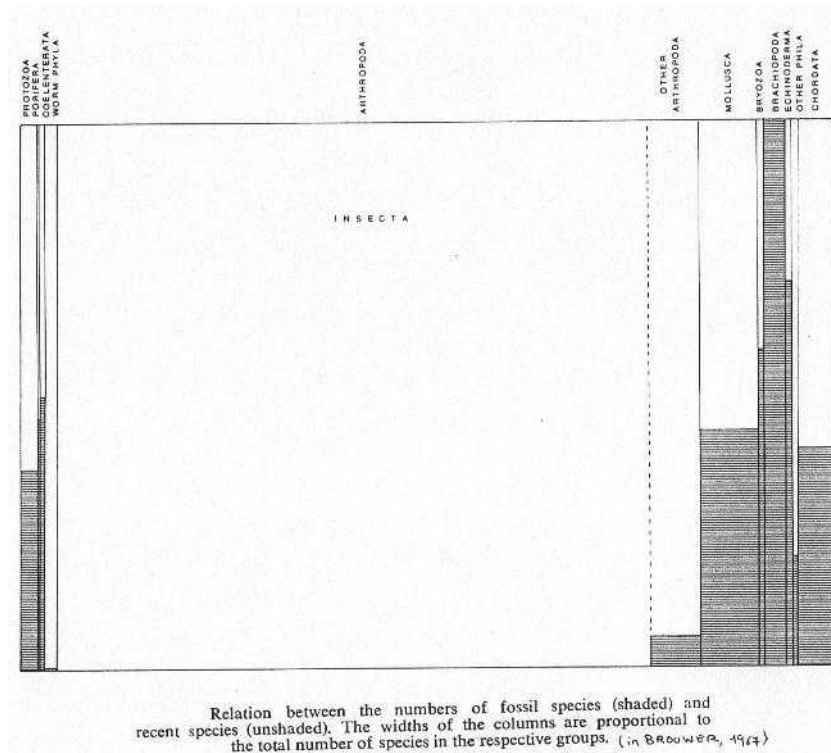
La paléontologie est loin d'avoir découvert tous les fossiles conservés dans les sédiments. Il y a une très forte distorsion entre le monde vivant et les peuplements fossiles.

A\ Echelle d'un groupe organique déterminé.



On compare sur ces documents le nombre d'individus vivants et le nombre d'espèces pêchées dans le plancton avec les sédiments actuels situés sur le même site. → Il y a une perte considérable en espèces et en individus, ainsi qu'une distorsion très importante.

B\ Echelle de la vie.



Les individus sans squelette en milieu marin sont rarement fossilisés et encore moins sur le milieu continental. Les animaux bien connus sont ceux à squelette ou à coquille.

Le cas des mollusques : il y a plus d'espèces actuelles que d'espèces fossiles. Toutefois, ces mollusques sont connus depuis plus de 500 millions d'années : déformation.

→ **Résultats** : Les fossiles ne donnent qu'une image très fragmentaire et déformée de la vie.

Actuellement, on compte trois millions d'espèces animales et végétales connues. Le nombre total d'espèces est estimé à 4,5 millions. Hors, seules 150 000 espèces fossiles ont été décrites ; soit, 3% des espèces connues actuellement et 3,3% des vivantes actuellement.

En 540 millions d'années, on estime qu'un milliard d'espèces a vécu sur terre et que 10 millions étaient fossilisable.

→ Les fossiles connus représentent $1/660^{\text{ème}}$ des espèces animales et végétales ayant vécu sur Terre et $1/66^{\text{ème}}$ des espèces fossilisable.

V\ L'espèce en paléontologie.

Les espèces sont nommées de manière identique à la biologie animale ou à la biologie végétale.

A\ Espèces paléontologiques et espèces actuelles.

L'espèce est l'unité de base de la classification mais l'espèce paléontologique diffère des espèces actuelles par divers aspects :

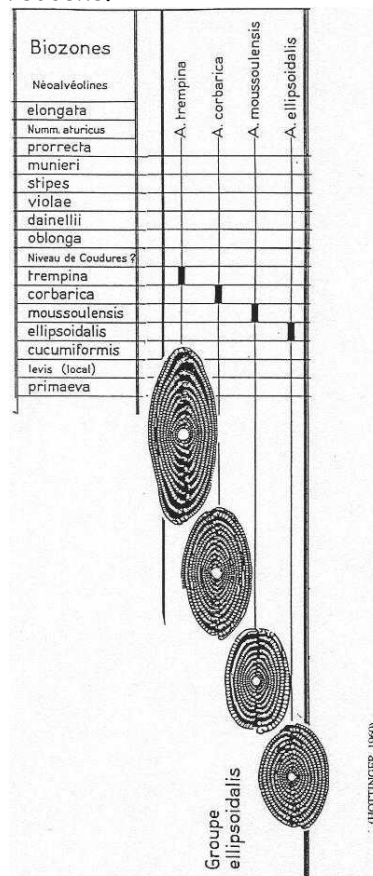
- Le paléontologiste travaille sur du matériel mort où les expérimentations sont impossibles.
- Les restes fossiles sont fragmentaires (parties molles sont inconnues). Malgré tout, il y a corrélation étroite entre divers caractères d'une même espèce. Donc, une espèce fossile peut être identifiée par une partie seulement de l'organisme.
- Les spécimens fossiles sont plus rares que les spécimens actuels. Les collections d'individus sont peu abondantes et on n'est jamais sûr qu'elles soient contemporaines : il y a une difficulté pour étudier une population à un moment donné.
- Une espèce paléontologique est décrite, non seulement avec ses caractères à un moment donné mais aussi avec son évolution au cours des temps. On doit délimiter des espèces à un moment donné mais aussi au cours des temps.

B\ Définition de l'espèce paléontologique.

1\ Espèce typologique.

C'est la conception la plus ancienne. L'espèce est définie à partir des caractères d'un individu tenu pour représentatif : c'est le « type ». Il est déposé dans une collection puis décrit et figuré. Tout individu à morphologie semblable au « type » ou qui s'en rapproche suffisamment sera classée dans la même espèce : → le critère est la ressemblance.

Exemple : Les alvéolines de l'éocène.



On a diverses lignées et pour *ellipsoïdalis*, quatre espèces se succèdent dans le temps. Elles ont été décrites en 1960 par un suisse (Hottinguer).

Espèce 1 : *Ellipsoïdalis* (1883-Egypte) 6 millions d'années. Description : coquille de petite taille, peu allongée, spire serrée et petite loge initiale.

Espèce 2 : *Moussoulensis* (1960-près de Carcassonne, par Hottinguer). Description : un peu plus grande, un peu plus allongée (pôles plus aplatis), spire plus lâche, loge initiale de taille moyenne.

Espèce 3 : *Corbarica* (1960-dans les corbières, par Hottinguer). Description : encore plus grande, plus allongée, pôles pointus, spire serrée, loge initiale assez grande.

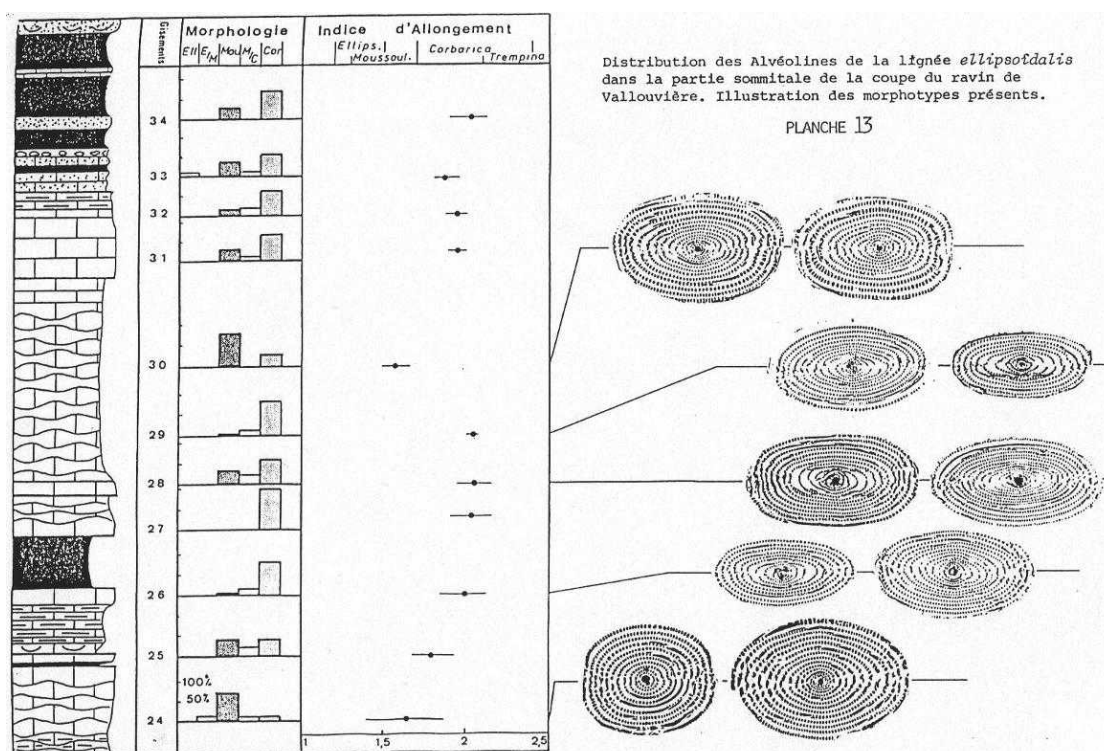
Espèce 4 : *Trempina* (1960-dans les Pyrénées, par Hottinguer). Description : plus allongée, plus grande, grande loge initiale.

Chacune de ces espèces est définie par un type qui sert de référence pour les déterminations.

Cette conception de l'espèce présente deux inconvénients majeurs :

- Le « type » : c'est le premier spécimen trouvé ou le mieux conservé parmi les premiers trouvés. Il ne peut pas être parfaitement représentatif des caractères moyens de l'espèce.
- Dans une espèce, tous les individus ne sont pas identiques et les formes plus ou moins éloignées du « type » ne sont pas toujours prises en compte pour la définition de l'espèce. L'appréciation des limites de l'espèce est très subjective.

Dans le Minervois, on constate que deux espèces peuvent cohabiter dans le même niveau.



On a des intermédiaires entre les espèces. A t'on deux espèces qui coexistent ou avons-nous des variations dans une même espèce.

2\ L'espèce biologique.

La biologie moderne donne cette définition. Magr : « L'espèce est constituée par les groupes de population naturelle réellement ou potentiellement interféconds et isolés quand à la reproduction de tout autre groupe semblable. ». On a ici un critère de descendance.

Notion d'interfécondité : on peut appréhender cette notion d'interfécondité par l'analyse des populations. En effet, dans la mesure où il y a une continuité morphologique dans une population, on peut en déduire qu'il y a eu des croisements, donc interfécondité.

L'espèce est définie à partir d'un groupe d'individus : « la série type ». On prend un représentant moyen : « l'holotype ». Les autres sont les « paratypes ».

Pour créer une espèce, il faut faire une étude statistique de population à partir de données biométriques. Si la population est hétérogène, l'analyse fera apparaître des discontinuités. Si la population est homogène, on a alors une distribution Gaussienne. Si elle ne l'est pas, c'est qu'il y a plusieurs espèces.

Réalisation d'histogrammes de répartition de population en fonction de l'indice d'allongement :

Quand le nombre d'individus est suffisant, les histogrammes indiquent une population homogène. → Dans chaque gisement, la population est homogène et ne renferme qu'une espèce.

Tableau 3

La répartition dans les temps géologiques des principaux groupes organiques

	VEGETAUX	INVERTEBRES										VERTEBRES
	Bactéries et cyanophycées Chlorophycées Rhodophycées Périophycées Périophytes Champignons, mousses, charas Gymnospermes Angiospermes	Coelentérés Hexacorallaires Annélides Spongiaires Protistes Brachiopodes Crustacés Echinodermes Echinides réguliers Echinides irréguliers Bryozoaires Céphalopodes	Gastéropodes Lamellibranches	Poissons Amphibiens Reptiles Mammifères Oiseaux								
Quaternaire												
Pliocène												
Miocène												
Oligocène												
Eocène												
Crétacé												
Jurassique												
Trias												
Permien												
Carbonifère												
Dévonien												
Silurien												
Ordovicien												
Cambrien												
Précambrien												

Dans la partie inférieure : la moyenne correspond à moussoulensis mais avec aux deux extrémités de la population, des représentants d'ellipsoïdalis et de corbarica.

Dans la partie supérieure : la moyenne correspond généralement à corbarica mais avec, aux extrémités, des représentants de moussoulensis et de trempina.

→ Finalement, ellipsoïdalis, moussoulensis, corbarica et trempina sont des formes différentes d'une même espèce. De la base au sommet de la courbe, on passe d'une population à moussoulensis dominante à une population corbarica dominante. Toutefois, des croisements se produisent toujours entre ces formes. Dans le détail, les proportions des deux formes fluctuent en fonction des conditions du milieu.

→ On a donc une seule espèce biologique qui évolue par un remplacement d'individus à caractères archaïques par des individus à caractères plus évolués : c'est une chronoespèce.

Cette conception biologique de l'espèce est plus objective mais nécessite la mise en œuvre de méthodes statistiques qui ne sont pas toujours applicables en paléontologie :

- Le nombre d'individus collectés est souvent insuffisant.
- Les individus collectés dans un même gisement ne parviennent pas toujours d'une population naturelle et ne découlent pratiquement jamais d'une même génération.

→ En paléontologie, l'espèce biologique est un idéal à atteindre mais on ne peut souvent définir qu'une espèce typologique.

C\ La validité de l'espèce paléontologique.

Quelle que soit la démarche utilisée (typologique ou biologique), l'espèce paléontologique est uniquement fondée sur des critères morphologiques. Hors, ces critères sont totalement insuffisants, comme le montre trois phénomènes :

- Le polymorphisme : c'est la coexistence dans une même population d'individus interféconds mais morphologiquement différents.
- Le polytypisme : c'est l'existence dans une même espèce de populations morphologiquement différentes (« races » géographiques).
- Les espèces jumelles : ce sont des ensembles morphologiquement identiques mais séparés génétiquement (drosophiles).

Dans le cas où il y a polymorphisme ou polytypisme, s'il y a ségrégation morphologique, il se produira au cours des temps une ségrégation génétique.

Dans le cas des espèces jumelles, il y a d'abord séparation génétique puis, avec le temps, séparation morphologique.

Il y a un décalage pour la distinction des espèces entre la paléontologie et la biologie. (en avance : polymorphisme ; en retard : espèces jumelles).

Histoire générale de la biosphère.

I\ Précambrien et première manifestation de la vie.

A\ Conditions chimiques du précambrien.

L'atmosphère primitive s'est formée après l'accrétion de la Terre et un dégazage du manteau (-4,6 milliards d'années).

Composition de cette atmosphère : H_2O (vapeur), H_2 , CH_4 , NH_3 , H_2S , SO_2 , CO_2 , N_2 . L' O_2 libre est absent. Il n'y a donc pas de couche d'ozone.

Cette atmosphère a été déduite des inclusions gazeuses que l'on a retrouvées dans des diamants ou dans des cristaux de sels.

L'océan : il résulterait de la condensation de toute l'eau au cours du refroidissement de la Terre (mêmes éléments chimiques que l'atmosphère plus des sels solubles dont des chlorures des sulfates et du phosphate qui proviendraient de la croûte terrestre. On obtient donc des eaux salées, chaudes et légèrement basiques ($pH \approx 8$). Les UV arrivaient à la surface de l'eau et arrivaient jusqu'à dix mètres de profondeurs. L'oxygénation de la terre fut plus ultérieure (- 3,5 milliards d'années).

L' O_2 apparaît en mer mais passe en totalité dans l'atmosphère. Quand le taux d' O_2 atteint 1% dans l'atmosphère, une partie de l' O_2 libre peut se maintenir dans l'océan (ce qui se produit à - 2,5 milliards d'années). On le sait car des oxydes de fer apparaissent dans les sédiments marins durant le protérozoïque. La teneur en O_2 augmente fortement. A la fin du précambrien, la teneur en O_2 est de 18% (contre 21% actuellement) et de 1mL/L dans l'océan.

B\ Evolution biochimique.

La vie dépend de la présence de molécules organiques.

1\ L'origine des premières molécules organiques.

Trois hypothèses expliquent l'origine des premières molécules organiques.

- La soupe primitive : Sous l'effet des UV et de charges électriques (foudre), les composés chimiques des océans primaires (en particulier : H_2 , CH_4 , NH_3) se condensent en entraînant la formation de molécules organiques. Cette formation n'a lieu qu'en surface (à cause des UV). Ces molécules vont ensuite descendre à plus de dix mètres de profondeur et être préservées des UV. Cf. l'expérience de Miller qui permet la synthèse de 90 molécules de la vie : acides aminés, acides nucléiques, lipides, glucides et polypeptides.

- Les sources hydrothermales : Le volcanisme sous-marin aurait apporté les composants chimiques de base (CH_4 , H_2S , H_2 , CO_2 , ...). Le magma apporte, lui, l'énergie thermique qui permet la synthèse de molécules, or, actuellement, ce fait est impossible à cause de l'oxygénation de l'océan.
- La Panspermie : A ce moment là, de sont desensemencements d'origine extraterrestres qui sont à l'origine de la vie sur Terre par leur accumulation dans les eaux anoxiques (sans O_2). Les composants chimiques se rencontrent dans les nuages interstellaires ; dans le vide et à -260°C , on peut obtenir des molécules organiques. De plus, certaines météorites renferment des acides aminés, des acides nucléiques, des lipides et d'autres molécules organiques (comme dans les comètes).

2\ Les macromolécules et leur réplique.

L'assemblage d'acides aminés permet la formation de protéines avec la possibilité de reproduction à l'identique (de ce mécanisme). Fox, par expérimentation, à obtenu, à partir de plusieurs acides aminés, des protéinoïdes (des protéines non biologiques). Les argiles ont pu catalyser la formation de macromolécules d'ARN par absorption de ribose, de phosphate et de bases nucléiques sur la surface des feuillets.

3\ Le passage macromoléculaire à la vie.

Les macromolécules doivent pouvoir s'auto organiser et croître pour donner des structures prévivantes, intermédiaires entre l'état chimique et l'état vivant. On a pu obtenir ceci par expérimentation.

α \ L'expérience d'Oparin.

Par un mélange de polypeptides et de nucléotides, on obtient des gouttelettes ($2-500\mu\text{m}$) : des coacervats capables d'absorber des glucides et des acides aminés pour croître : ces coacervats ont un métabolisme rudimentaire.

β \ Fox.

En partant de protéinoïdes, Fox a obtenu des microsphères capables de croître et de s'entourer d'une membrane et même de bourgeonner.

→ On peut dire que les microsphères et les coacervats sont des modèles expérimentaux de ce que furent les protobiontes (→ premières structures organisées, comparables aux virus, mais sans en être). Certains de protobiontes, les plus organisés, protégés d'une enveloppe plus épaisse et capables de se reproduire auraient franchis l'étape de la vie.

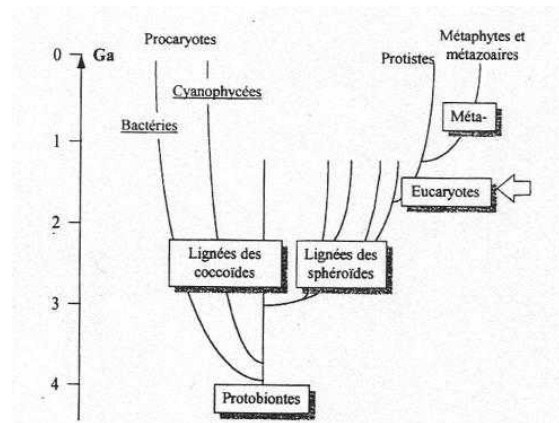


FIGURE 49 : Evolution schématique de la vie sur la Terre au cours des temps géologiques.

C\ Témoignage de la vie au précambrien.

1\ Identification de la vie.

On considère la vie présente quand une structure organique individualisée possède un métabolisme et peut se reproduire. Il existe deux types de critères :

- Morphologie : il consiste à repérer des structures limitées par des parois et pouvant se retrouver en exemplaires semblables. Les pièces minéralisées sont exceptionnelles, souvent en silice. Des artéfacts sont toujours possibles.
- Composition chimique : on a les structures organiques (molécules organiques complexes) telles que les charbons, kérogène, porphyrines ne pouvant résulter que de l'accumulation de matière organique.

2\ Les coccoïdes : composants de nature organique.

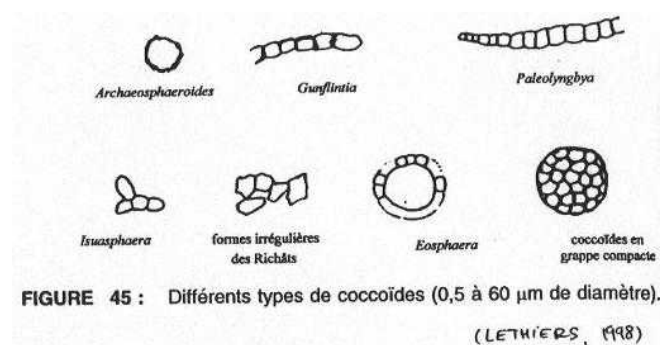


FIGURE 45 : Différents types de coccoïdes (0,5 à 60 µm de diamètre).

(LETHIERS, 1998)

Elles ressemblent à des bactéries actuelles. Elles sont connues de 3,8 milliards d'années jusqu'à 200 millions d'années. On trouve aussi des formes isolées ou associées de manière irrégulière (isuusphaera : la plus ancienne connue).

On les trouve : en filaments ou en grappes sphériques.

Les coccoïdes sont la souche des procaryotes caractérisés par un régime dit autotrophe primitif (synthèse de matière organique à partir de CH_4 et d' H_2S). On peut aussi trouver un régime hétérotrophe (cannibalisme primaire).

3\ Les sphéroïdes.

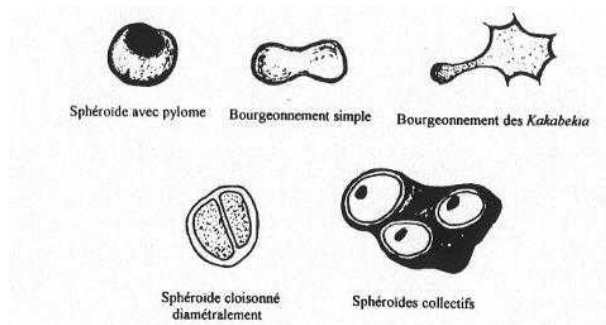


FIGURE 46 : Différentes formes de sphéroïdes (5 à 60 μm de diamètre).

Ce sont des micro-fossiles à membrane épaisse de forme plus ou moins sphérique présentant des bourgeonnements ou des pores (orifices) qui libèrent de nouveaux sphéroïdes (connus entre 3,6 milliards et 800 millions d'années). Ils sont cloisonnés diamétralement : on a une division par mitose.

On considère qu'ils seraient à l'origine des eucaryotes (il y aurait une mitose par division). Ils pourraient dériver de coccoïdes à grappe compacte qui se serait entourés d'une enveloppe et qui aurait associé des organites cellulaires à fonctions différentes et d'autotrophes primitifs ou hétérotrophes.

4\ Les stromatolithes.

Ce sont des masses calcaires avec une surface mamelonnée à aspect stratiforme ou formant des piliers ; ils présentent toujours une très fine lamination qui indique une croissance rythmique par encroûtement successif. Elles existent toujours (en Australie). Elles résultent de l'activité de cyanophycae qui piègent les sédiments et fixent les boues calcaires. Leur régime est autotrophe par photosynthèse (CO_2 et H_2 permettent la synthèse de matière organique).

→ Les stromatolithes entraînent une diminution de la teneur du milieu en CO_2 et une augmentation de celle d' O_2 libre.

Les cyanophycae sont donc à l'origine du grand développement de l' O_2 dans l'océan et dans l'atmosphère. Elles vivent sur les plate-formes marine peu profondes. Les premières sont apparues il y a 3,5 milliards d'années en Australie. Leur prolifération a eu lieu entre 2,5 milliards d'années et 600 millions d'années. Maintenant, elles sont en déclin.

5\ Les métazoaires : faune d'Ediacara.

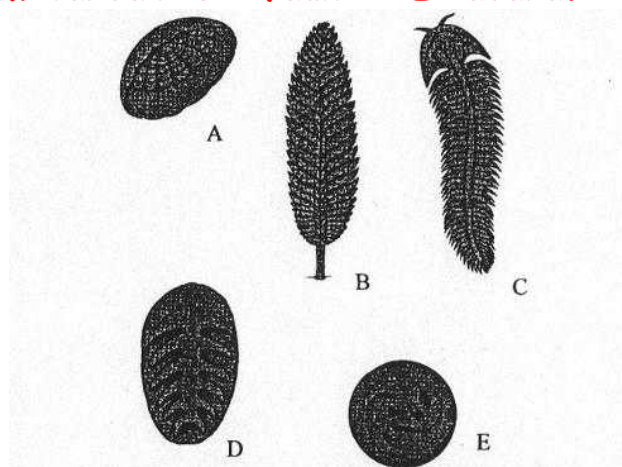


FIGURE 48 : Exemples d'organismes appartenant à la faune d'Ediacara. A = médusoïde; B = Pennatulide du genre *Charnia*; C = Annélide du genre *Spriggina*; D = Arthropode primitif du genre *Vendia*; E = organisme à classement incertain, du genre *Tribrachidium*. Ordre de grandeur des individus : 1 à 3 cm.

Ils sont connus dans tous les boucliers anciens à partir de 800 millions d'années. Ils sont surtout connus par un gisement en Australie (-580 millions d'années) où l'on a trouvé 1500 spécimens appartenant à une trentaine de formes qui ne sont que des empreintes.

Plus de la moitié de ces empreintes proviennent de coelentérés (méduses, pennatulidés [fixés]). Les autres sont plus énigmatiques ; ils doivent être des ancêtres d'annélides, d'arthropodes et d'échinodermes.

D'autres considèrent qu'il s'agit d'un groupe spécial, les vendobiontes, qui auraient absorbé l'O₂ et les nutriments dissous par toute la surface du corps et auraient vécu en symbiose avec des algues.

Ce peuplement marin très original disparaît à la fin du précambrien (540 millions d'années).

II\ La vie au paléozoïque.

A\ Paléozoïque inférieur (540-410 millions d'années).

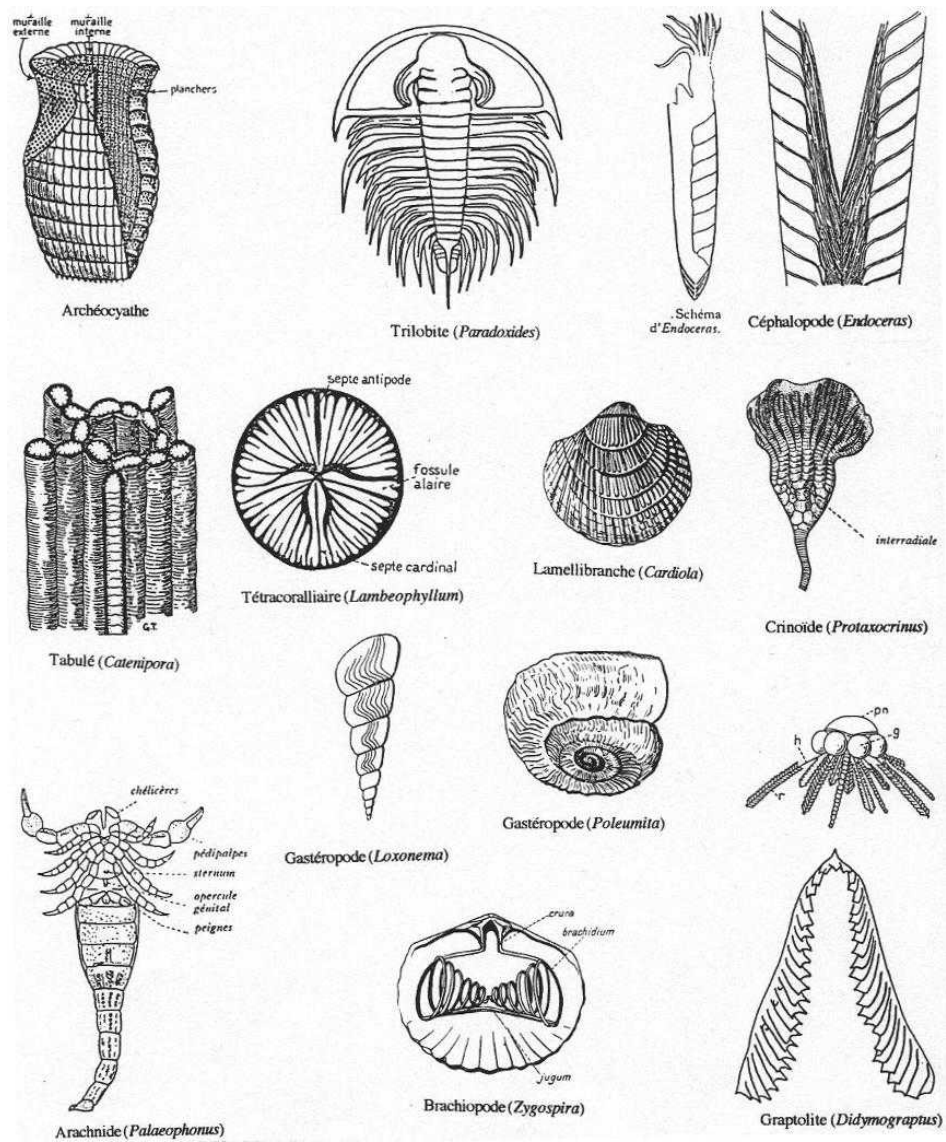
1\ Limite précambrien/cambrien.

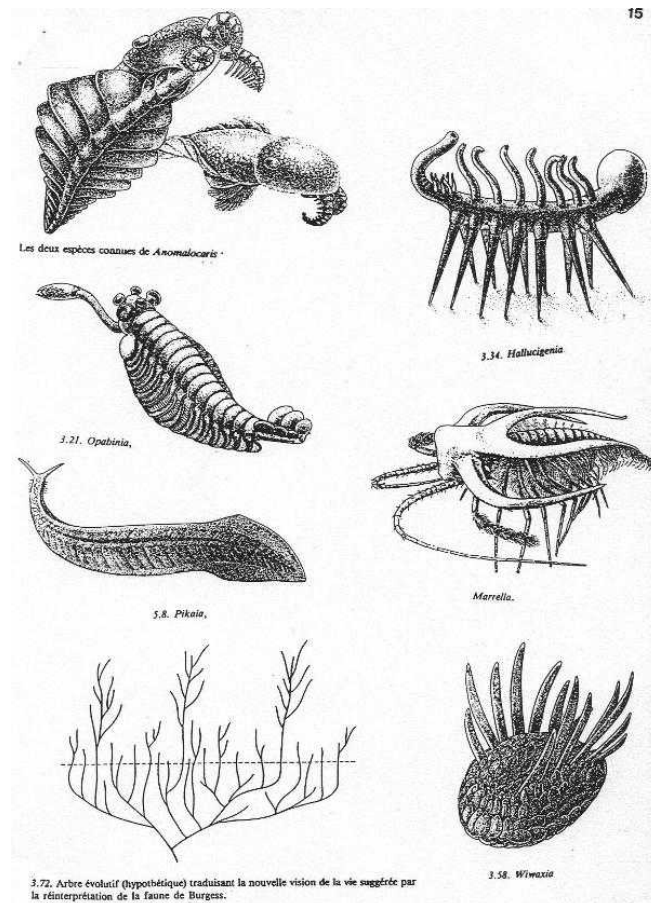
Entre le précambrien et le cambrien, il y a des événements fondamentaux : apparition de carapace et de coquille du fait de la concentration en O₂ qui devient inférieure à 1mL/L d'eau. C'est le seuil à partir duquel les invertébrés vont extraire le carbonate pour former la coquille.

Ces carapaces ont un rôle protecteur. A partir de ce moment, on a une pièce fossilisable qui permet l'accroissement des documents paléontologiques.

2\ Vie marine.

On a un développement de groupes très particuliers (faune primitive) qui n'ont pas de représentant actuel (sans descendance). Les schistes de Burgess (cambrien moyen, Canada) contiennent un peuplement très diversifié décimé par une crise : Achéocyates, Grapholithes...





On note la présence de tous les groupes d'invertébrés actuels avec des formes primitives vivant sur une plate-forme :

- Arthropodes et trilobites.
- Cœlentérés madréporaires (polypiers).
- Céphalopodes ; annélides ; lamellibranches ; brachiopodes ; échinoderme.

3\ L'apparition des vertébrés.

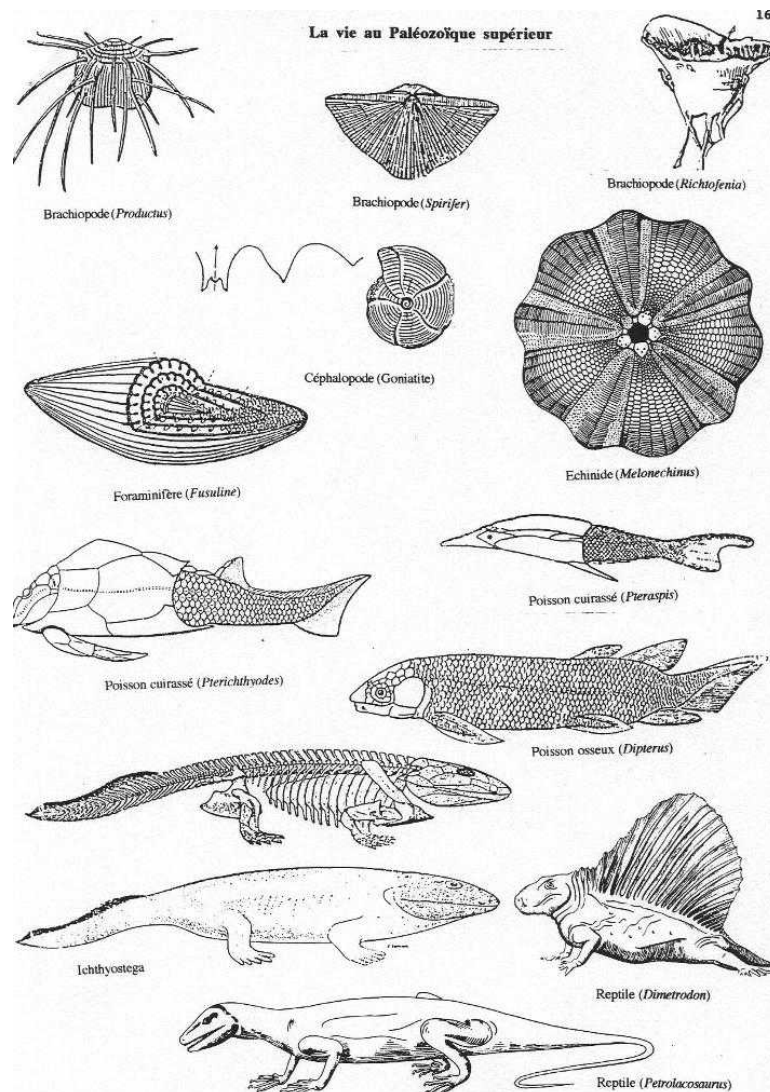
Dans les schistes de Burgess, on trouve Pikaia que l'on considère comme procordé. Les premiers vertébrés sont connus à la fin du paléozoïque inférieure ; par exemple, au silurien on a les agnathes, des poissons cuirassés (carapace osseuse).

* Sur Terre : à la fin du paléozoïque inférieure, on trouve les premiers fossiles continentaux de flore : ptéridophytes primitifs sans racine différenciée (et arachnides).

B\ Le paléozoïque supérieur : 410-250 millions d'années.

1\ La vie marine.

On assiste à l'extinction des graptolites et à la régression des trilobites. C'est l'épanouissement et la diversification des céphalopodes (goniatites) et des brachiopodes (fixés ou pélagiques).



Il y a apparition des foraminifères et des échinides.

Les poissons cuirassés sont remplacés par les poissons. Ce phénomène ne dure toutefois pas longtemps : jusqu'à la fin du dévonien. On peut l'expliquer par le développement de toute la lignée des poissons.

2\ En milieu continental : la conquête des continents.

α\ Les végétaux.

Deux flores se succèdent : une au dévonien (les psilophitales, dans les marécages) et une au carbonifère et permien (les ptéridophytes et les gymnospermes).

β\ Les invertébrés.

Divers groupes gagnent les continents, comme les crustacés géants (2 mètres de long) au dévonien, ils sont dans des eaux saumâtres. Au carbonifère, ils passent dans les eaux douces. Les gastéropodes et les lamellibranches passent aussi en eau douce.

Les myriapodes, insectes (libellules de 80cm, blattes qui n'évolueront plus) et arachnides apparaissent.

3\ Le dévonien.

Dès le dévonien, les poissons gagnent le milieu continental. Parmi les espèces qui franchissent la limite, on trouve : les dipneustes (dipterus) et les crossoptérygiens (nageoires articulées).

Au dévonien supérieur, les crossoptérygiens donnent naissance aux amphibiens par un animal intermédiaire qui est inconnu (appelé Ichtyostéga). Les amphibiens sont encore assujettis à la vie aquatique.

4\ Carbonifère et Permien.

Au carbonifère supérieur se différencient les reptiles qui sont totalement libérés de l'eau grâce aux œufs adaptés.

Dès le permien, les reptiles se divisent en deux lignées :

- Les sauropsidés qui donneront les autres reptiles.
- Les théropsidés ou reptiles mammaliens qui donneront les mammifères.

III\ La vie au mésozoïque (Trias - Jurassique - Crétacé), 250MA-65MA.

Les continents étaient largement recouverts par des mers peu profondes. Ces eaux étaient chaudes (10°C de plus que maintenant) et riches en ions (éléments chimiques). Le climat était donc doux et peu contrasté.

→ Les conditions étaient très favorables à la vie.

A\ Vie marine très florissante.

Les algues et les protistes prolifèrent. Le plancton était très abondant. On va avoir un développement de nouveaux coelentérés (hexacoralliaires), de nouvelles pousses évolutives chez les mollusques (lamellibranches) adaptés à la vie récifale (rudistes).

On observe aussi le développement de nouveaux céphalopodes : ammonites et bélemnites. Le phénomène arrive chez les brachiopodes et les échinides irréguliers).

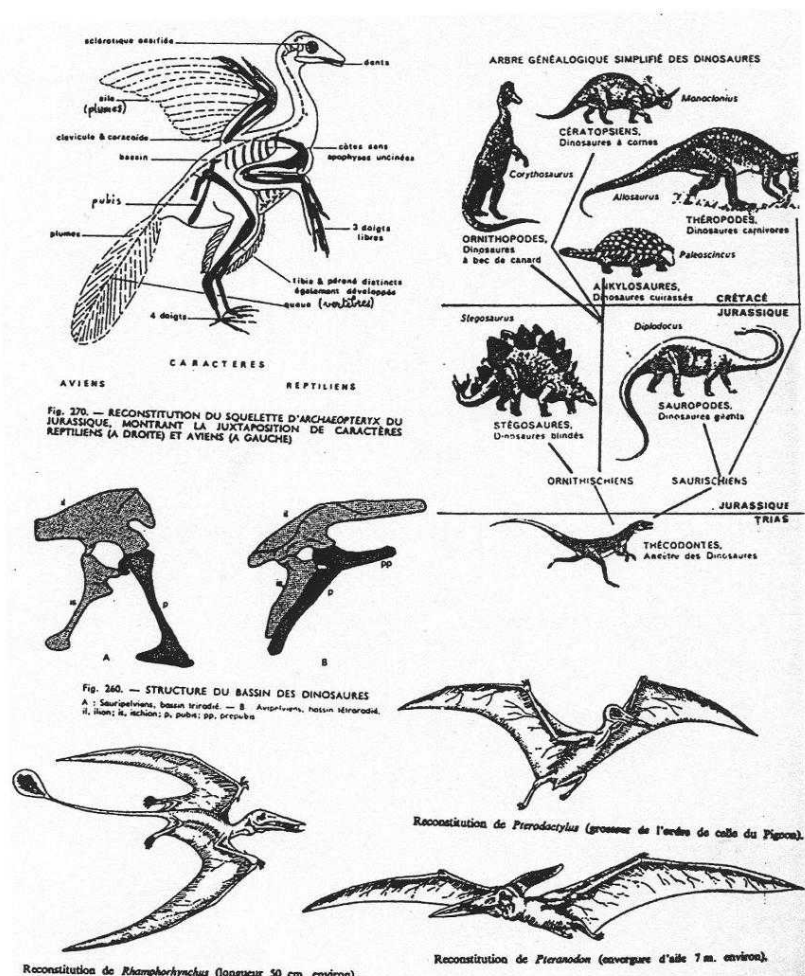
Les poissons sont très proches de ce qu'ils sont actuellement.

B\ Vie continentale.

On assiste à un renouvellement de la flore.

Les ptéridophytes régressent, les gymnospermes dominent et les angiospermes apparaissent au jurassique supérieur.

Le mésozoïque voit principalement le développement des grands reptiles avec les dinosauriens.



Les dinosauriens vont se diviser en deux lignées :

- Les sauripelviens : à bassin triradié.
- Les avipelviens : bassin tétraradié (+ le pré-pubis).

Les reptiles peuplent les mers mais aussi les airs (ptérosauroiens).

Au jurassique supérieur, les dinosauriens triradiés donnent naissance aux oiseaux. L'animal intermédiaire est archéoptéryx. On n'en a trouvé que 6 dans le monde, et tous en bavière. Les écailles donnent les plumes.

C'est à cette période que l'on connaît les premiers mammifères descendant des reptiles mammaliens : ils sont petits et vivent la nuit.

IV\ Vie au cénozoïque : éocène, oligocène, miocène, pliocène (-65MA à presque actuel).

La vie est profondément renouvelée. On le voit particulièrement en milieu marin : On peut aussi observer un épanouissement des gastéropodes. Les brachiopodes régressent et sont remplacés par les lamellibranches. Les céphalopodes sans coquille externe prennent la place des ammonites et des bélemnites.

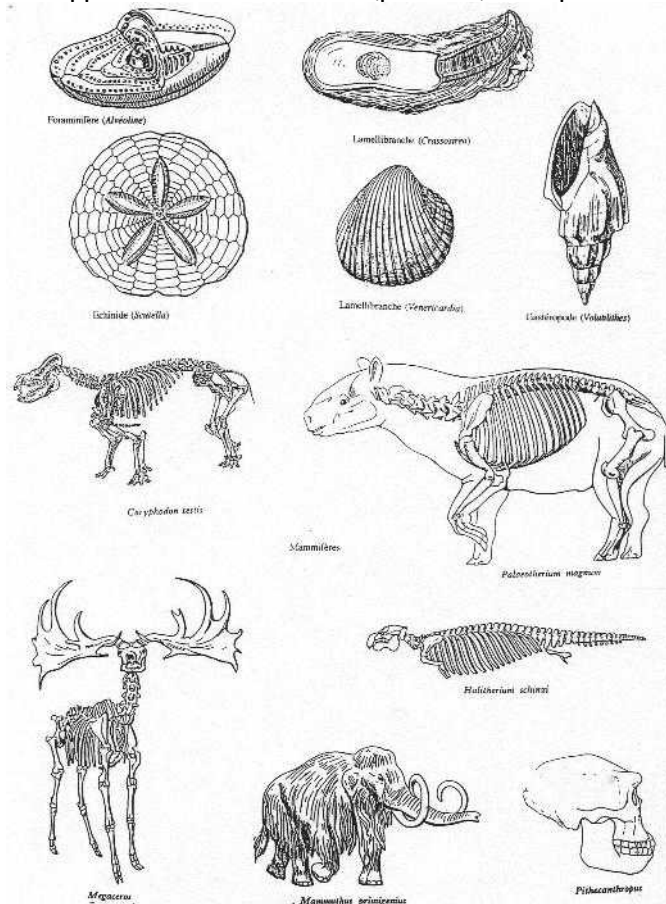
De plus, on voit une diversification des échinides et une apparition de nouveaux foraminifères comme les alvéolines et les nummulites.

En milieu continental, on observe une diminution des gymnospermes au profit des angiospermes. C'est l'ère des mammifères et les reptiles sont en forte régression.

On peut observer deux faunes successives :

- Une au début du paléocène : faune archaïque sans descendance.
- Dès l'éocène, il y a explosion de toutes les lignées actuelles.

Il ne faut pas oublier l'apparition des hominidés (pliocène) et l'épanouissement des oiseaux.



V\ Conclusion.

- Les grands groupes apparaissent dans un ordre de complexité croissante (différent de la diversité).
- Tous les grands groupes d'invertébrés sont connus au primaire.
- L'évolution des vertébrés se réalise en totalité au cours du phanérozoïque.
- Des formes intermédiaires existent entre les groupes de vertébrés. Cela prouve qu'il y a continuité dans l'évolution.
- Les formes marines précèdent toujours les formes continentales que ce soit à l'échelle de la vie ou de chaque groupe.
- Les périodes d'expansion des divers groupes se succèdent dans le même ordre que leur apparition. On trouve les relais : gymnospermes → angiospermes, brachiopodes → lamellibranches, reptiles → mammifères.

A chaque ère ou sous-ère géologique correspond un peuplement spécifique. Une ère est un renouvellement biologique majeur. Mais il reste le problème des crises biologiques.

Les grandes crises biologiques.

I\ Définitions.

Les grandes crises biologiques correspondent à l'extinction en masse d'espèces sur une durée de l'ordre de 10.000 ans à 1 million d'années. Ces extinctions sont reconnaissables à l'échelle de la planète. On peut en distinguer trois types :

- Extinction graduelle.
- Extinction par étapes.
- Extinction catastrophique.

Il y aurait eu deux grandes crises. La plus importante des deux a eu lieu à la fin du permien (-245 millions d'années) et aurait fait disparaître entre 50 et 57% des animaux marins et plus de 50% des familles d'animaux terrestres.

On peut observer quatre crises majeures :

- Fin de l'ordovicien (-435 millions d'années) : -25% des familles d'animaux marins.
- Fin du dévonien supérieur (-365 millions d'années) : -22% des familles d'animaux marins.
- Fin du trias (-215 millions d'années) : -22% des familles d'animaux marins.
- Limite crétacé-tertiaire : -15% des familles d'animaux marins.

On distingue également quinze crises intermédiaires.

Depuis le permien, on peut observer une périodicité de 26 millions d'années dans les crises.

II\ La crises intermédiaire du cénomanién supérieur.

A\ Caractéristiques biologiques.

Cette crise a éliminé 7% des familles et 26% des genres d'animaux marins.

Dans un premier temps, il y a eu élimination de peuplements benthiques (vivent au fond) : rudistes, foraminifères, ostracodes. Dans un second temps, les peuplements planctoniques (entre deux eaux) ont été éliminés. Cette extinction s'est faite sur une étape de un million d'années, à la partie supérieure du cénomanién et jusqu'au sommet de cette même période.

B\ Evènements géologiques.

On a mis en évidence deux évènements importants :

- Deux couches noires dues à un développement de marnes noires. Elles sont riches en matière organique d'origine marine et disposées en fins feuillets (ou lamines) → il n'y

avait pas de vie sur le fond. Par contre, on y trouve des micro-fossiles planctoniques venant des eaux de surface.

- Ces eaux étaient anoxiques, pauvres en O_2 dissout. Il y a eu aussi une très forte montée du niveau marin (+250 mètres par rapport au niveau actuel). Les teneurs en $^{18}O_2$ (indicateurs de la température des eaux) indiquent que ces eaux étaient chaudes.

C\ Interprétation de l'arrivée de CO_2 magmatique.

A la fin du cénomanien, il y a eu une production exceptionnelle de croûte océanique. Il y a donc arrivée d'une grande quantité de CO_2 magmatique. Les eaux se sont chargées en CO_2 , sont devenues plus lourdes et sont restées au fond. Le niveau de la mer va monter : transgression. Plus d'eau est donc soumise au rayonnement solaire (→ la température augmente).

→ Finalement, on obtient un système d'eau stratifiée : il n'y a plus de brassage des eaux, donc pas d'oxygénation possible des fonds et les organismes benthiques sont les premiers éliminés.

Par contre, la matière organique est conservée sur le fond car il n'y a pas d'oxydation.

→ C'est une crise biologique en relation avec la tectonique des plaques.

III\ La crise de la limite crétacé/tertiaire.

A\ Caractéristiques biologiques.

C'est une crise spectaculaire qui affecte tous les milieux.

1\ Le milieu marin.

15% des familles, 45% des genres et 76% des espèces disparaissent. En moyenne, 80% du plancton est détruit (tout le reste de la chaîne trophique en souffre). Les ammonites, les bélemnites, les rudistes et les reptiles marins vont disparaître ou fortement diminuer.

Il y a extinction de nombreux genres de brachiopodes, de foraminifères qui s'éteignent.

Seuls les peuplements des grands fonds ne sont pas touchés.

2\ Le milieu continental.

Il n'y a pas de changement majeur dans la végétation. Tous les dinosaures et reptiles volants disparaissent. Les autres vertébrés sont touchés dans des proportions variables.

Les organismes d'eau douce sont les moins touchés.

3\ Deux types d'extinction.

- Extinction graduelle :

Cette extinction a lieu sur 2 millions d'années, durant le maastrichien supérieur (dernier étage du crétacé) : c'est la fin pour des rudistes et des ammonites. Pour les dinosaures, ça se discute.

- Extinction brutale :

Là, l'extinction est catastrophique, exactement à la limite entre le crétacé et le tertiaire.

B\ Evènements géologiques.

On observe une régression marine se reproduisant à la fin du crétacé. A -67 et -65 millions d'années, on a deux baisses. La première est plus importante que la seconde.

→ La géographie change avec une extension plus faible des mers épicontinentales.

Si les mers se retirent, les eaux se refroidissent (ici, perte de 5°C en moyenne).

On a relevé les traces d'un intense volcanisme : les trapps du Deccan (essentiellement situé en Indes). Ces trapps sont un empilement de basaltes sur deux kilomètres d'épaisseur. Ce volcanisme a duré 600.000 ans.

On trouve, exactement à la limite crétacé-tertiaire (K/T), un niveau riche en iridium ainsi que la présence de quartz choqués et de magnétites nickélifères qui sont toujours d'origine extraterrestre. On peut aussi trouver des microtectites qui sont des gouttelettes de verre résultant de la mise en fusion de la croûte terrestre.

→ Ces indices sont sur toutes la surface du globe : il y a donc eu un impact météoritique. Au Mexique, on a le cratère de Chixulub d'un diamètre de 250 kilomètres.

C\ Interprétation : trois causes néfastes.

1\ La régression marine.

Au cours du maastrichtien supérieur, il y a diminution du taux d'expansion océanique qui provoque une régression marine, un retrait des mers avec donc, des eaux plus froides et un climat plus continental.

Les organismes adaptés aux eaux chaudes vont périr (rudistes) alors que les organismes adaptés à un climat plus contrasté survivront.

2\ Les trapps du Deccan.

La mise en place du point chaud qui est à l'origine des trapps du Deccan va entraîner la production de grandes éruptions volcaniques qui vont éliminer la luminosité et provoquer des pluies acides.

3\ L'impact météoritique.

Une météorite d'un diamètre compris entre 15 et 20 kilomètres est venue s'écraser sur Terre. Elle venue se désagréger sur une couche d'anhydrite et a provoqué un dégorgement d'acide sulfurique : 600 milliards de tonnes d'H₂SO₄ ont été expulsées.

Au moment de l'impact, la collision a créé un choc thermique qui a apporté brutalement un échauffement et provoqué des incendies. De plus l'impact a rejeté dans l'atmosphère une grande quantité de poussières qui ont arrêté les rayons lumineux → Absence de photosynthèse.

Pendant plusieurs dizaines de milliers d'années, il est resté un anneau de poussières autour de la Terre → « hiver » par absence de rayons solaires arrivant au sol.

→ La température baisse de plusieurs degrés.

Ces perturbations sont fatales aux organismes en déclin (aux organismes spécialisés comme les rudistes).

Les deux premières causes sont liées à la dynamique terrestre et créent des extinctions graduelles.

La dernière cause est d'origine extraterrestre : extinction catastrophique.

IV\ La crise de la limite permien/trias.

A\ Caractéristiques biologiques.

Cette crise touche tous les peuplements marins et continentaux.

1\ En milieu marin.

En milieu marin, les trilobites, tabulés, tétracoralliaires et certains foraminifères disparaissent. Les ammonoïdés sont décimés (-98% des espèces). 90% des genres de brachiopodes disparaissent et 98% des familles d'échinodermes meurent. 75% des familles de bryozoaires sont éliminées.

→ Au total, le pourcentage maximum de disparition en milieu marin a été de 83% des genres et 96% des espèces.

2\ En milieu continental.

Les gymnospermes diminuent fortement. Au dessus de la limite, il y a prolifération des mycètes associée à un taux élevé de débris végétaux.

→ C'est « l'événement fongique » d'une durée de 50.000 ans.

Les vertébrés sont fortement touchés : perte de 75% des familles. 63% des familles d'insectes sont perdues.

Ces extinctions se déroulent à la fois : par étape (4 épisodes chez les vertébrés au permien supérieur) et graduelles (céphalopodes et échinodermes).

L'événement fongique fait penser à un événement catastrophique.

B\ Evènements géologiques.

Au permien, un continent unique (la Pangée) est formé de deux branches :

- Au sud : le Gondwana.
- Au nord : la Laurasia.

Sur ce continent unique, cinq évènements se succèdent.

1\ Changement climatique global.

Au permien inférieur, on a un climat de glaciations. On passe au trias inférieur sans glaciation → cela se traduit par des argiles noires et du charbon.

Au permien supérieur et au trias, on a des couches détritiques rouges (typiques des climats désertiques) ainsi que des évaporites.

La tendance à l'aridité s'accroît, surtout entre le permien et le trias : le climat bascule, devient plus chaud et moins contrasté entre les pôles et l'équateur. Les déserts se développent et notamment, la zone équatoriale humide devient plus aride.

Les causes de ce changement sont : un changement de l'orbite terrestre et le fait de n'avoir qu'un continent unique.

2\ Régression marine au permien supérieur.

Durant le permien, le niveau des mers a chuté de 250 mètres. Cette baisse est due à un arrêt de l'expansion océanique → Il y a croissance de 6% du volume océanique.

La régression va accentuer la continentalisation du climat. Elle réduit aussi la surface des mers épicontinentales.

→ Il y a émergence des dépôts du carbonifère et du permien inférieur qui étaient riches en matière végétale. Le carbone organique va être oxydé, ce qui provoque la libération de CO_2 dans l'atmosphère.

3\ Baisse de la salinité marine.

Il y a un développement des mers fermées et notamment dans les zones climatiques chaudes. Les sels s'accumulent et donnent des mers sur salées.

Ce sel est prélevé du stock normalement dissout dans les océans.

La baisse de la salinité aurait été comprise entre 5 et 10 pour mille.

Conséquence : les organismes qui ne tolèrent pas des variations de la salinité sont décimés : coraux, céphalopodes, échinodermes.

4\ Volcanisme intense.

Un volcanisme intense se produit en Sibérie, d'une épaisseur de plus de 3 kilomètres, sur une surface de $2,5 \cdot 10^6 \text{ km}^2$.

On a identifié 11 éruptions principales à la limite entre le permien et le trias, sur une durée inférieure à un million d'années. Ces éruptions amènent dans l'atmosphère du SO_2 , du CO_2 et un obscurcissement du ciel.

5\ Transgression brutale et considérable.

En quelques milliers d'années, le niveau remonte de 210 mètres grâce à la création de nouvelles zones d'expansion.

Les eaux arrivant sont chaudes et chargées en CO_2 , ce qui diminue la solubilité de l' O_2 dans l'eau.

→ C'est une eau mal oxygénée (dysoxique) qui va transgresser sur les continents.

C\ Interprétation.

Au permien supérieur se développent des conditions défavorables à la vie (changements climatiques, régression marine avec diminution du milieu marin et baisse de la salinité).

À la limite permien/trias s'ajoute une nouvelle condition défavorable : le volcanisme intense qui perturbe la végétation. C'est un de ces phénomènes volcaniques qui est à la base de l'événement fongique.

Sur cette biosphère affaiblie, s'abat une nouvelle épreuve, à la base du trias : la transgression d'eau mal oxygénée.

Aucun de ces facteurs, seul ; ne pouvait provoquer une extinction importante. C'est la conjonction des divers facteurs qui a provoqué la plus grande crise biologique.

Dans cette crise, c'est la dynamique interne de la Terre qui joue un rôle majeur.

La dynamique du système solaire, la variation de l'orbite terrestre aurait pu influencer sur le climat.

V\ Conclusions

- Les fossiles enregistrent le comportement de la Terre et de l'univers : c'est à dire que le principal moteur de l'évolution biologique est externe aux organismes.
 - Les extinctions sont dues : à des changements de la dynamique terrestre (climat, niveau des mers, chimie de l'eau), à des événements extraterrestres (climat et rayonnement solaire).
 - Les grandes crises sont dues à la conjonction de plusieurs causes néfastes.
 - Il y a une périodicité dans les crises qui pourrait être due au fait que l'orbite de la Terre traverse une ceinture d'astéroïdes (nuage d'Oort).
 - Si l'on regarde ce qu'il se passe depuis que l'Homme est sur la Terre, on voit :
 - La disparition de nombreuses espèces.
 - La transformation d'espèces.
- L'Homme peut créer une crise biologique.

Principales phases de la macroévolution des céphalopodes.

Les céphalopodes correspondent à une classe qui appartient à l'embranchement des mollusques. Ils sont caractérisés par un mode de vie marin et un régime carnivore : ce sont des prédateurs.

Il existe quatre sous-classes :

- Nautiloïdés (tétrabranchiaux). Ils ont une coquille externe et sont les derniers représentants actuels de ce cas (coquille externe).
- Coléoïde (dibranchiaux). On trouve dans ce groupe la seiche à coquille interne.
- Ammonoïdés (fossiles). Ils étaient à coquille externe.
- Bactritoïdés (fossiles). Ils étaient à coquille externe.

I\ Les premiers céphalopodes : les nautiloïdea.

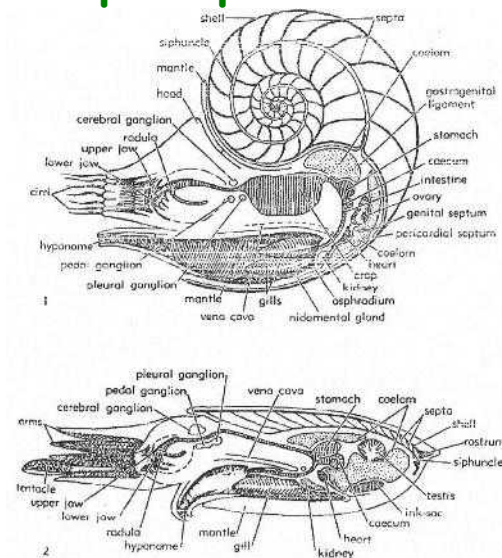


FIG. 1.—Median longitudinal section of (1) *Nautilus* and (2) *Sepia*, showing anatomy of typical nautilus. Sections of the two major groups of living cephalopods (Lester Nautilus, 1928, p. 83).

A\ Caractères généraux.

Leur position de vie est avec l'ouverture en bas.

Ils sont connus depuis le cambrien. Leur coquille est externe et ils vivent dans la dernière loge ou chambre d'habitation.

La coquille est divisée par des cloisons concaves vers l'avant, traversées par un siphon (liaison à la loge initiale) qui est soit marginal, soit central et il traverse la cloison par un goulot siphonnal tourné vers l'arrière ou rétrosiphonné.

L'intersection entre la cloison et la coquille entraîne la formation de la « ligne de suture », rectiligne ou légèrement sinueuse.

B\ Les formes souches : ellesmocerida.

Ces formes sont caractérisées par une coquille droite et légèrement courbe. La suture est rectiligne. Il y a une absence d'ornementation sur la coquille. Cette dernière est de petite taille (1 à 2 cm de long).

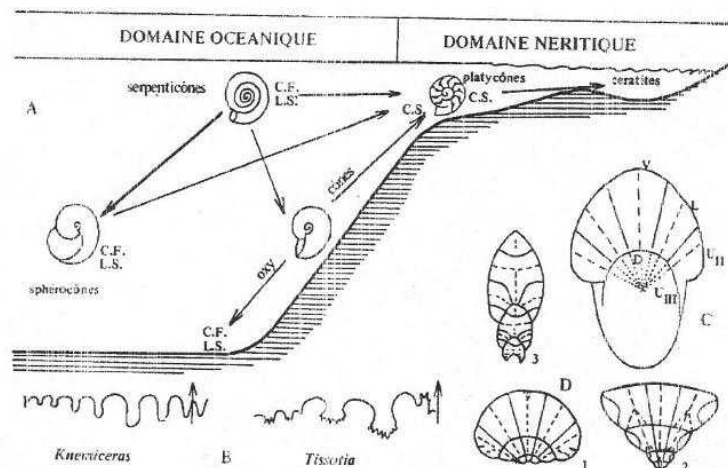
C\ La diversification au paléozoïque.

Dès l'ordovicien, les ellesmocerida donnent naissance à différentes lignées : diversification, épanouissement et dispersion géographique. On peut observer cinq tendances évolutives qui apparaissent.

1\ L'augmentation de la taille par allongement d'une coquille droite (jusqu'à 2 mètres de long).

Les orthocerida.

2\ L'augmentation de taille par enroulement de la coquille : les Nautilida.



5.27. Signification morpho-fonctionnelle des cloisons. A. Modèle interprétatif des caractères de la coquille des Ammonicoles (forme générale, ornementation, espacement, force et complexité des cloisons) et de leur mode de vie. B. Sutures pseudogoniaticque de *Kueniceras* (*Engonoceras*, Albien) et pseudocératitique de *Tissotia* (*Tissotidae*, Coniacien-Santonien). C. Vue frontale de la cloison de *Macrocephalites* à support central (axe des lobes en tireté, des selles en trait plein). D. Différentes formes à support central ; les axes des lobes et des selles reposent : 1. sur des éléments homologues des cloisons du tour précédent ; 2. sur des éléments homologues ou différents ; 3. seulement sur des éléments non homologues (D'après Wright (B), in Moore, 1957 ; Westermann, 1958 (C, D) ; Tintant *et al.*, 1982 ; Ward et Westermann, 1985 (A)). CF = cloisonnement fort (cloisons serrées, très plissées), CS = cloisonnement faible (cloisons espacées et simplifiées). (ENAY, 1990)

La coquille qui était initialement protectrice devient un organe de suspension et maintient le centre de gravité près du corps.

3\ La complexification de la ligne de suture.

Elle devient sinueuse, avec un enroulement de la coquille. Les replis des cloisons entraînent un renforcement de l'architecture de la coquille (augmentation de la surface d'attachement).

Les bactritoïdea sont au carrefour de tous les céphalopodes. Ils apparaissent à l'ordovicien et sont surtout représentés au paléozoïque supérieur avec des caractères des « formes-souches » :

- Petites tailles : 2 à 5cm.
- Une structure simple, droite ou légèrement courbe, sans dépôt interne, à ornementation faible.
- Ils possèdent à la fois des caractères :
 - De nautiloïdés (cloisons concaves vers l'avant à goulot rétrosiphonné).
 - De coléoïdés : siphon ventral et surtout, certaines espèces possèdent une coquille avec une couche externe faite de calcite rayonnante.
 - D'ammonoïdés : suture peu plissée possédant un lobe ventral.

On estime que les bactritoïdés dérivent de Nautiloïdés à siphon marginal, avec une innovation → Apparition du lobe ventral. Ils sont ensuite divisés en deux lignées :

- Bactritidae : apogée au dévonien et qui auraient donné naissance aux ammonoïdés par un enroulement de la coquille et la modification de la forme des cloisons (convexes vers l'avant).
- Probactritidae : apogée au carbonifère et au permien. Ils auraient donné les bélemnites par : une migration du manteau à l'extérieur de la coquille, une adjonction de pièces complémentaires (rostre) et d'importantes modifications du corps mou (on passe de quatre branchies à deux branchies et de quatre reins à deux reins). Toutefois, aucun intermédiaire n'est connu entre les bactritoïdés et les bélemnites.

Les bactritoïdés s'éteignent à la fin du permien mais après avoir donné naissance à tous les céphalopodes évolués.

III\ Céphalopodes dominants au paléozoïque supérieur et mésozoïque : les ammonoïdea.

A\ Caractères généraux.

1\ Les cloisons.

Les cloisons sont convexes vers l'avant.

2\ La ligne de suture.

La suture devient complexe et débute toujours par un lobe ventral.

3\ Le siphon.

Le siphon devient marginal et, la plupart du temps, est ventral (=externe).

B\ Les formes souches : les anarcestida.

Ces anarcestida descendent des bactritoïdea. Ils sont caractérisés par un enroulement planispiralé, une petite taille, une ornementation faible et une suture simple et peu découpée (en général, ils ont trois lobes).

C\ Les ammonoïdés du paléozoïque supérieur.

Dès le dévonien moyen, les anarcestida donnent trois lignées :

- Les clyméniida : le siphon est dorsal (interne). C'est un dispositif original qui n'aura pas de suite.
- Les goniatitida : leur taille est moyenne (≈40cm), leur ornementation est plus forte (persillée) mais ont plus de 3 lobes, le goulot siphonnal est tourné vers l'avant (ou prosiphonné).
- Les prolecanitida : leur coquille est de taille moyenne, avec un mélange de caractères évolués (ligne de suture avec de nombreux replis). Chez certaines espèces, des lobes sont denticulés (ou persillés). Par contre, ils présentent des caractères archaïques comme un goulot rétrosiphonné.

→ C'est une évolution mosaïque.

D\ Epanouissement au permo-trias : les ceratitida.

Les ceratitida descendent des prolecanitida (analogie de la ligne de suture). Ils en diffèrent par un goulot siphonnal prosiphonné.

Les ceratitida achèveront l'évolution des ammonoïdés du paléozoïque avec une grande diversité :

- Diversité de forme : à côté des coquilles en spirale, on voit apparaître des coquilles dé»roulées ou en spires hélicoïdales : des coquilles hétéromorphes. Ce sont des adaptations à des modes de vie particuliers.
- Diversité d'ornementation : très peu ornementée ou très ornementée → Adaptation aux différentes profondeurs d'eau.
- Diversité de taille : les ammonoïdés peuvent faire jusqu'à un mètre de diamètre. Les plus petits, les nanites, font moins de un centimètre de diamètre.
- Diversité de lignes de suture : les trois types de ligne de suture sont présents (goniatites, cératites, ammonites).

→ A la fin du trias, toutes les cératites disparaissent.

E\ Les ammonoïdés du jurassique-crétacé : ammonites évoluées.

La suture est complexe, le goulot est prosiphonné et leur taille varie de moyenne à grande (jusqu'à deux mètres de diamètre). Ces ammonites forment trois ensembles.

1\ Les phyllocératitidae.

Les phyllocératitidae descendent des cératitidae. Cela se voit par le dessin de la ligne de suture qui présente une réticulation en forme de spatule.

Leur coquille est mince, à section ogivale : coquilles platycônes. L'ornementation est faible.

Ce sont des adaptations à la vie sur les plateaux continentaux.

2\ Les lytocératida.

La coquille a une section circulaire, ornée de fines côtes transversales : coquille serpenticône. La suture est composée d'éléments peu nombreux. Ce sont des adaptations à la vie au large.

Au crétacé, elles vont donner naissance aux ammonites hétéromorphes.

→ Adaptation à une vie en suspension dans l'eau et passive.

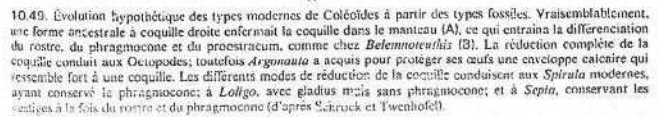
3\ Les ammonotida.

Les coquilles sont épaisses, très ornées, avec une suture complexe : coquilles sphérocônes. Les coquilles sont résistantes à de hautes pressions, pour une vie en milieu profond.

Au crétacé supérieur, elles ont donné naissance à des ammonites aplaties, peu ornées, avec une ligne de suture de type cératite.

→ La fin du crétacé marque la disparition de tous les ammonoïdés.

IV\ Les coleoïdea : bélemnites et céphalopodes modernes.



(d'après MEGLITSCH, 1974)

Au cours de l'évolution, le phragmocône devient de plus en plus petit alors que le rostre est le pro-ostracum se développent.

A la fin du crétacé, les bélemnites disparaissent.

B\ Les céphalopodes modernes.

Tous les céphalopodes modernes descendent des bélemnites et sont caractérisés par la réduction ou la disparition du squelette (c'est surtout le pro-ostracum qui peut rester).

La seiche a un pro-ostracum et un résidu de rostre.

Le calamar n'a que le pro-ostracum.

Le poulpe n'a plus de coquille interne.

La spirule perd le pro-ostracum et le rostre mais le phragmocône reste et s'enroule en spirale à l'intérieur.

V\ Conclusion.

L'évolution passe toujours par deux étapes :

- Des formes souches, de petite taille à structure simple.
- Une diversification et un épanouissement : adaptation à des milieux (modes) de vie variés : c'est la « radiation adaptative ».

Les formes souches (qui relancent l'évolution) permettent de mettre en place de nouveaux dispositifs. Ces formes succèdent à des crises biologiques qui rythment l'évolution.

On trouve deux modèles d'adaptation à la vie carnassière et à la nage qui sont successivement essayés. :

- 1^{er} modèle : complexification de la coquille externe.
- 2^{ème} modèle : allègement d'une coquille interne.

Il existe des groupes intermédiaires qui maintiennent une continuité dans l'évolution.

Exemples d'évolution intra spécifique et trans-spécifique : La Microévolution.

I\ L'évolution graduelle.

A\ Principe.

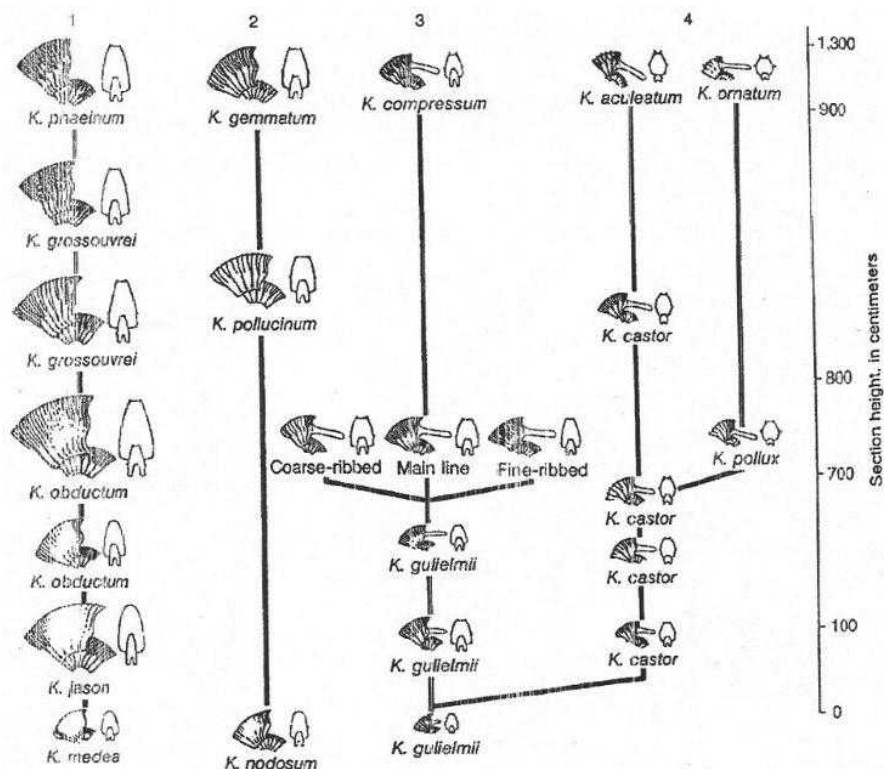
Dans ce processus, les populations se modifient au cours des temps, de manière continue (graduelle), généralement lente, par l'accumulation de changements minimes, triés et orientés par la sélection naturelle.

De génération en génération, le pourcentage des formes dérivées (sélectionnées) augmente et il détermine la modification progressive d'une lignée.

B\ Exemples.

1\ Les Kosmoceras de l'oxfordien (jurassique supérieur).

On peut observer deux rangées de tubercules de chaque côté. A Petersborough, une coupe de 13 mètres de haut a été réalisée.



De la base au sommet, on a une accentuation progressive de l'ornementation : les côtes sont de plus en plus fortes et les externes sont plus nombreuses. Cette même évolution est présente dans quatre lignées. En fait, on a deux lignées femelles (1 et 2) et deux lignées mâles (3 et 4), mais les noms sont différents entre les mâles et les femelles.

Tous les intermédiaires existent dans les diverses formes. Malgré tout, un saut brusque apparaît à 10 mètres 93,5cm de la base de la coupe.

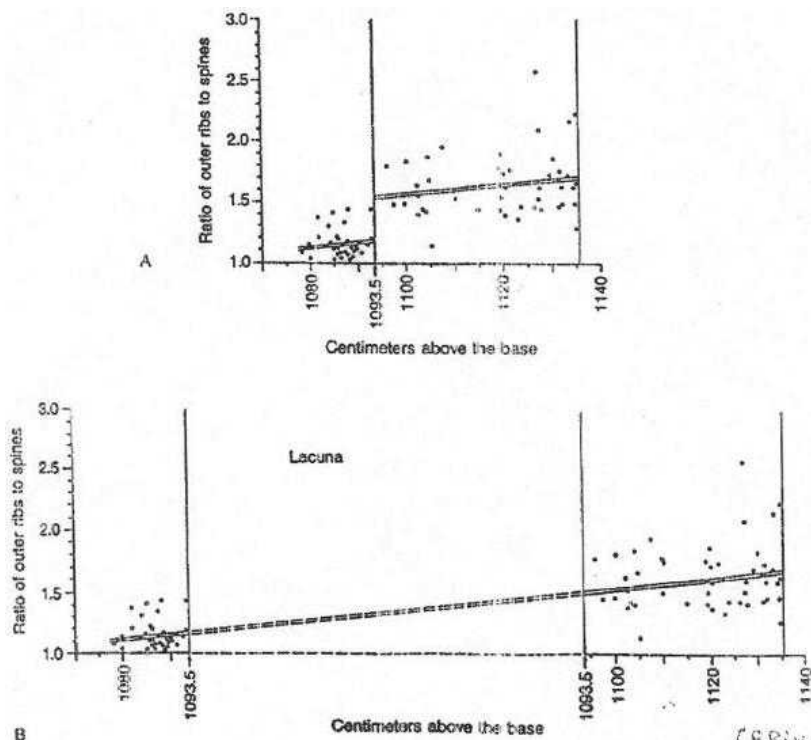


Figure A :

Sur cette figure, un point représente un individu. Ces points sont placés en fonction du rapport nombre de côtes sur nombre de tubercules. Les points représentatifs des individus s'alignent sur deux droites de régression. Ce saut est interprété comme correspondant à une lacune de sédimentation (arrêt de la sédimentation).

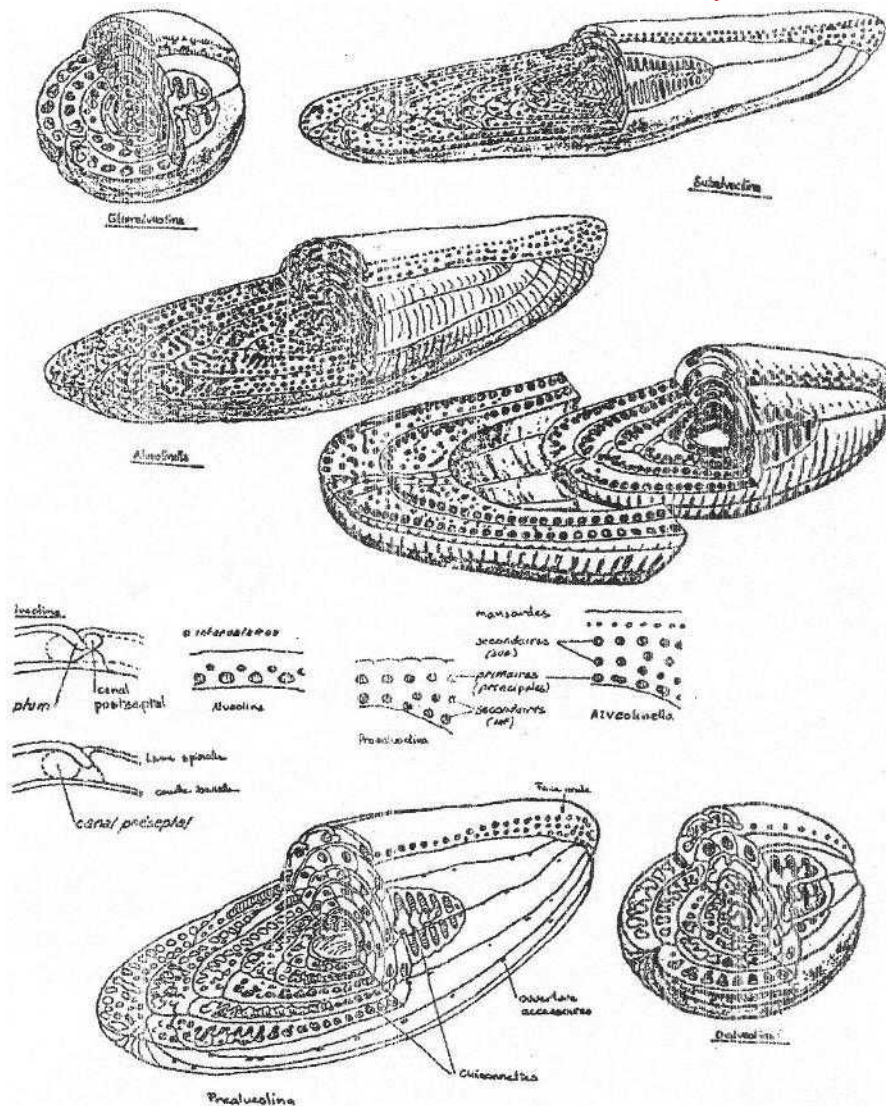
Figure B :

Sur cette figure, on insère du temps pour que les deux droites soient dans le même prolongement : cette lacune correspondrait à la durée de temps nécessaire pour une accumulation de 80cm de sédiments compactés.

- Le genre *Kosmoceras* se transforme au cours des temps, à l'intérieur de diverses lignées : chaque lignée est une « lignée évolutive ».
- Il y a deux lignées qui évoluent en même temps et de la même manière : c'est une « évolution parallèle ».
- Les discontinuités qui apparaissent dans l'évolution sont considérées comme des discontinuités de sédimentation.

En domaine marin de plate-forme, la sédimentation est un phénomène très discontinu. Il est donc très difficile d'observer l'évolution continue d'un groupe (ou lignée).

2\ Les alvéolines (foraminifères benthiques) de l'éocène.



Les alvéolines comprennent plusieurs lignées.

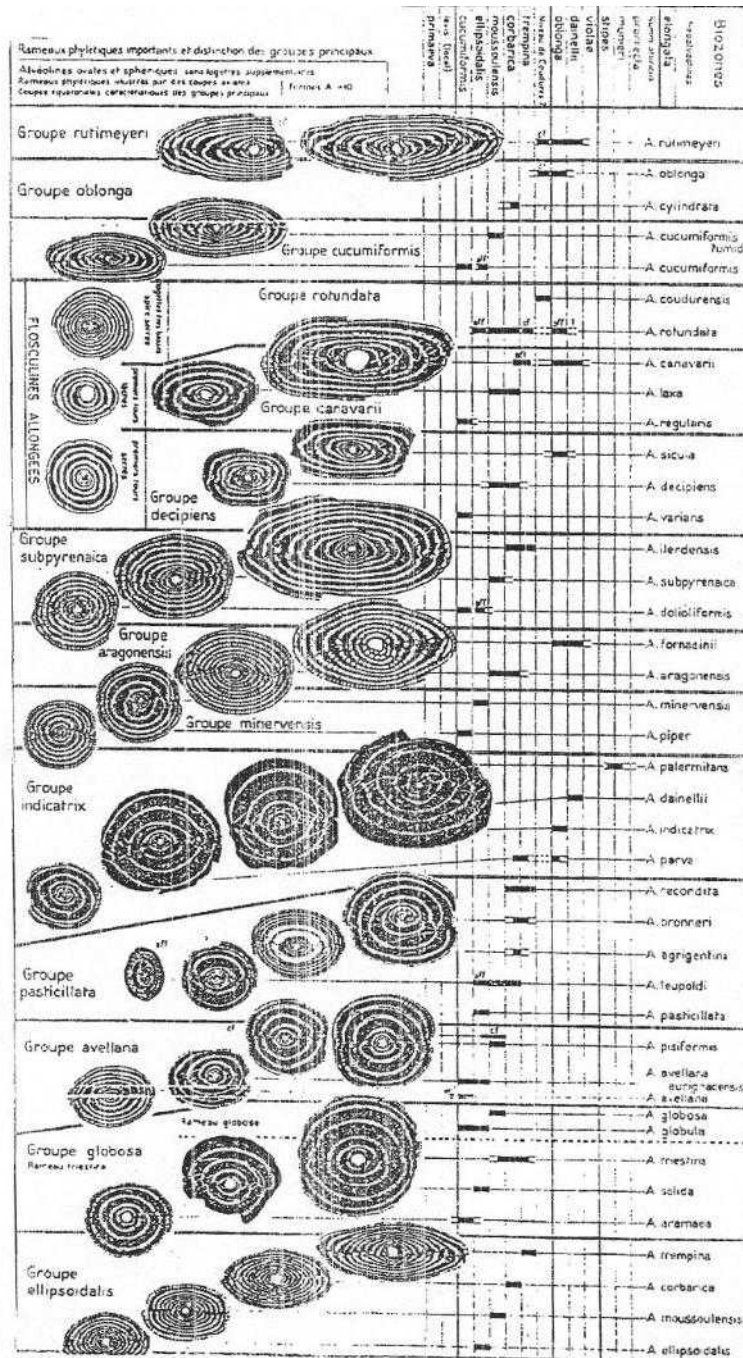
Ici, on voit différentes lignées (ou groupe, dans ce cas) qui se distinguent les unes des autres, par des dépôts calcaires plus ou moins développés et par des pôles plus ou moins aigus.

Deux tendances évolutives apparaissent, elles sont opposées à cause de la spécialisation au milieu.

La première tendance est une évolution vers un allongement axial (majorité des lignées), ce qui est une adaptation à la vie dans les sédiments et à des milieux relativement agités.

La seconde tendance est une évolution vers un raccourcissement axial : la forme est de plus en plus globuleuse. C'est une adaptation à la vie sur les plantes et à des eaux calmes.

On connaît, dans les différentes lignées, tous les stades intermédiaires et la population est toujours homogène (courbe de Gauss unimodale). Au cours des temps, cette courbe se déplace dans le sens du rapport longueur sur largeur (L/l).



→ L'évolution porte donc sur la forme, mais aussi sur la taille. Cette taille augmente au cours. L'évolution tend vers cet accroissement de taille, c'est la « loi » de Cape.

→ Ici aussi on trouve des évolutions parallèles. On en déduit que le hasard n'intervient pas seul dans l'évolution.

→ La même tendance évolutive apparaît sur l'échelle des genres et sur un intervalle beaucoup plus long (macroévolution).

Au crétacé, Ovalveolina → Préalveolina → Subalveolina.

A l'éocène, Globalveolina → Alveolina → Alveolinella.

A l'échelle de la macroévolution, on passe d'un genre à l'autre sans intermédiaire.

3\ Les globigérinoïdes (foraminifères planctoniques) du miocène inférieur (-20 à -11 MA).

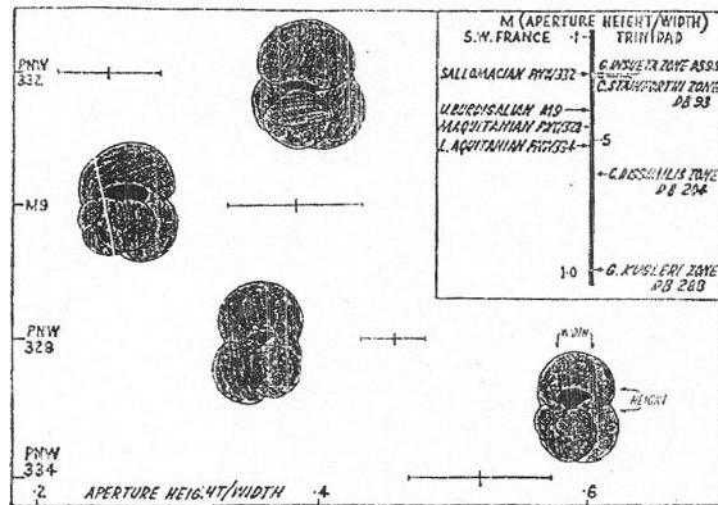


Fig. 21 - Evolution de Globigérinoïdes en Aquitaine.

Les globigérinoïdes sont dans les mers chaudes.

Ici, l'évolution porte sur la forme de l'ouverture. Dans la lignée de Trilobas, l'ouverture est de plus en plus aplatie. Sur la lignée d'Altiaperturgus, la tendance est inverse et l'ouverture est de plus en plus haute.

Ces globigérinoïdes se retrouvent sur tout le globe. Cela semble être dû à des changements du niveau marin.

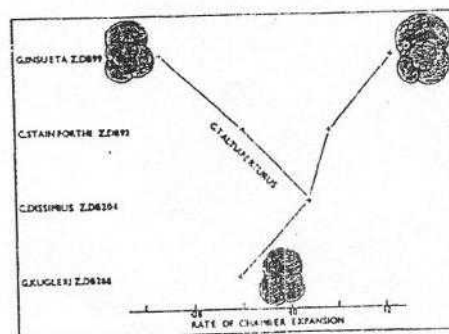
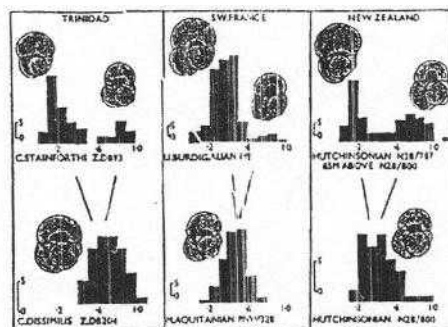
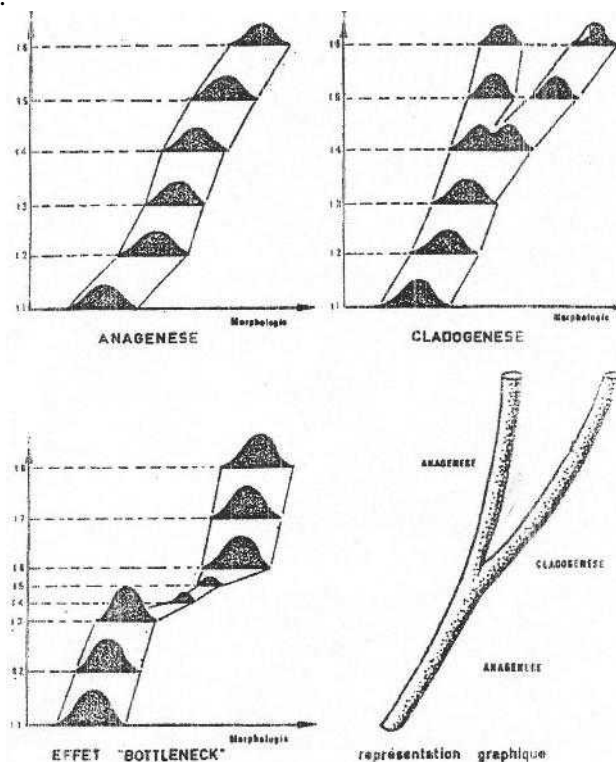


Fig. 22 - Evolution de Globigérinoïdes à l'échelle du globe.

C\ Conclusions.

Cette évolution graduelle se fait selon deux modalités distinctes :

- L'anagenèse. C'est la transformation progressive, dans le temps, d'une seule lignée par la dérive morphologique de la population → la sélection joue au niveau des individus.
- La cladogenèse. C'est l'éclatement d'une lignée en plusieurs rameaux qui sont généralement divergent. Les causes peuvent être des facteurs géographiques ou écologiques. On peut citer l'exemple des coquilles St Jacques. Jusqu'à il y a 5 millions d'années, il n'y avait pas Panama qui rattachait l'Amérique du nord à l'Amérique du sud et ces coquilles St Jacques étaient partout les mêmes. Quand l'isthme s'est créé, il y a eu évolution différente des espèces Atlantiques et Pacifiques.



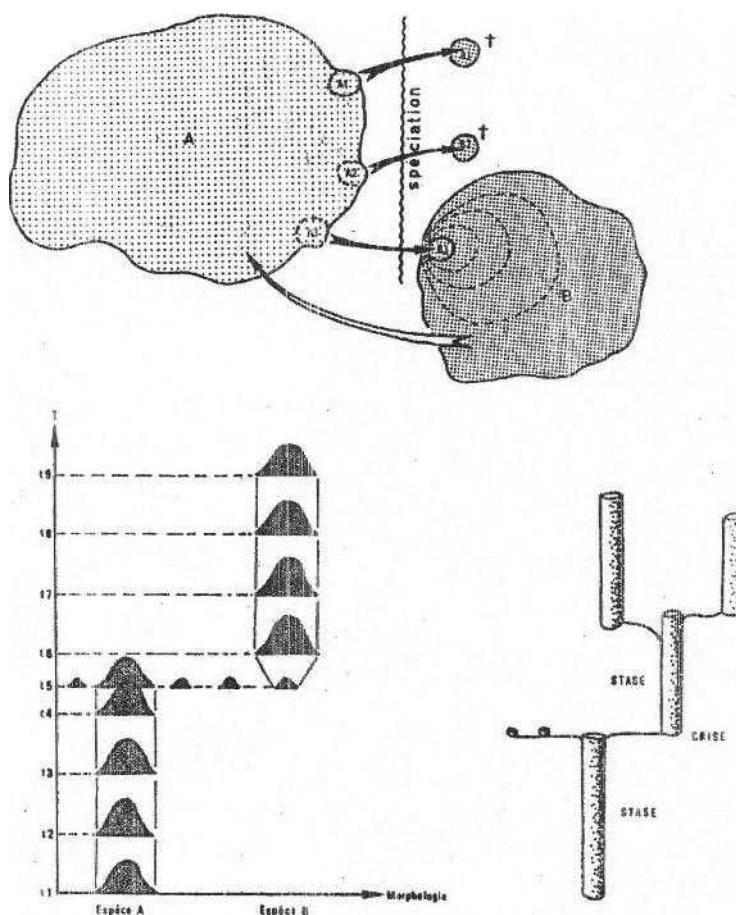
II\ L'évolution quantique.

A\ Principe.

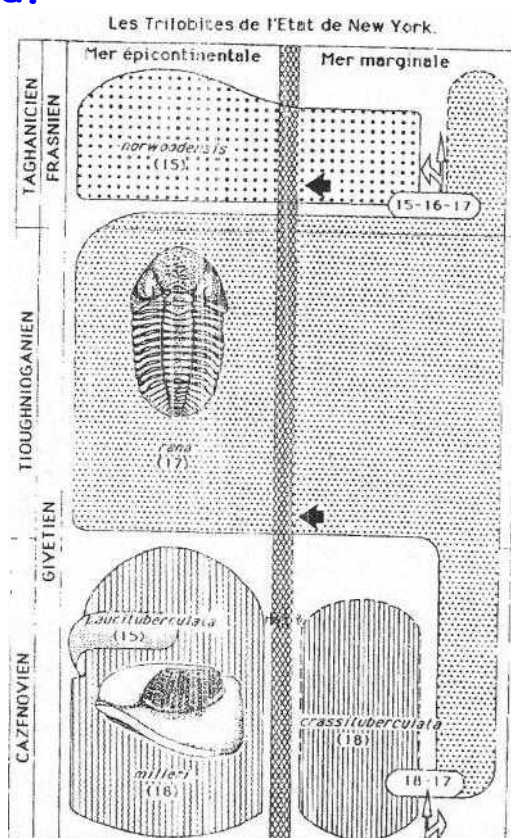
L'évolution passe par une alternance de longues phases d'équilibre (stases), pendant lesquelles une espèce ne montre pas de changements notables, et de phases de crises, brèves et qui modifient brutalement une lignée.

L'évolution est réalisée par des sauts successifs, sans individu ni étape intermédiaire. Les discontinuités morphologiques font parti intégrante de l'évolution quantique.

Pour le paléontologiste, une espèce apparaît brutalement puis reste inchangée sur de longues périodes avant d'être remplacée par une autre espèce.



B\ Exemple : les phacops (trilobites) du dévonien en Amérique du nord.



Les trilobites ont des yeux à facettes qui sont disposés en files. Le nombre de files de facettes est un caractère distinctif des facettes et aussi un caractère évolutif.

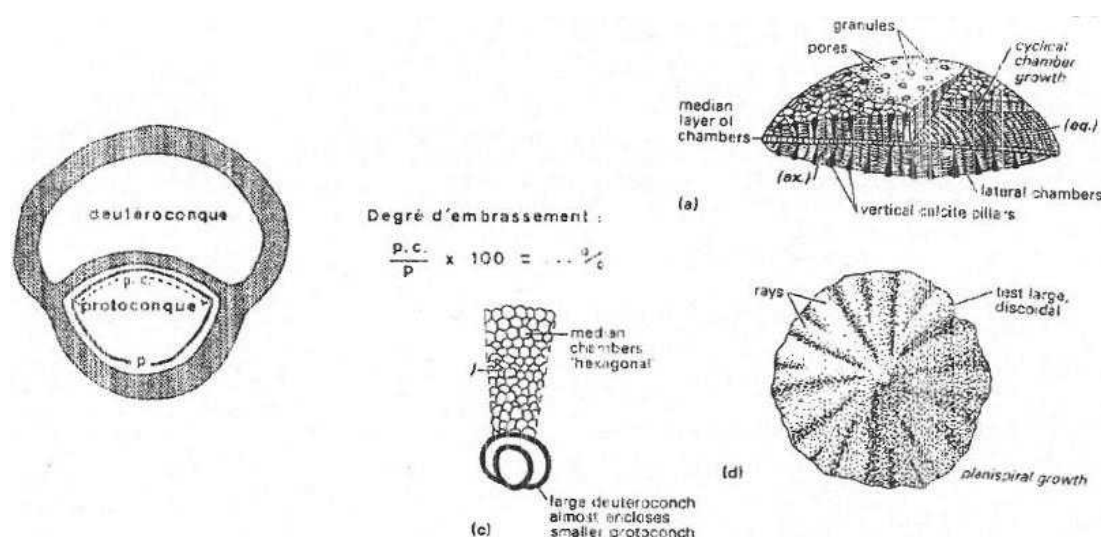
Dans les trois étages successifs, on a trois populations différentes. Dans chacune d'elle, tous les individus ont le même nombre de files de facette et il n'y a aucune modification sur la durée de l'étage.

III\ L'évolution itérative.

L'évolution itérative est la répétition durant les temps géologiques du même motif évolutif.

A\ L'anagenèse itérative.

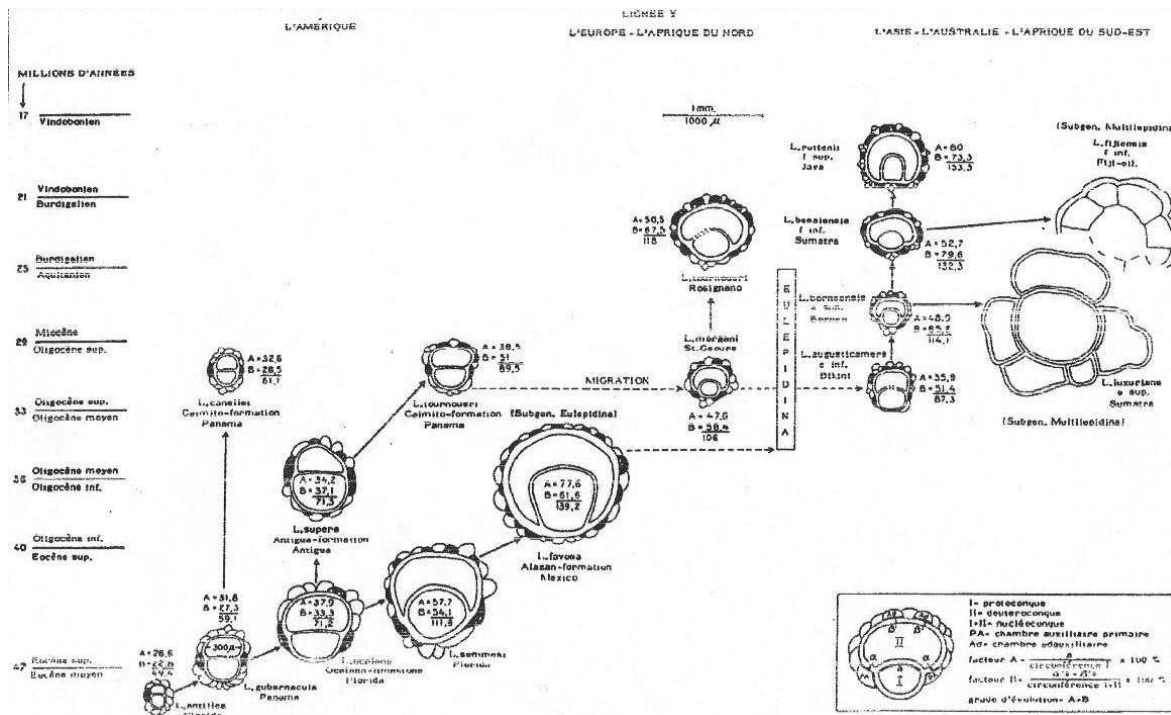
1\ Exemple de Lépidocyclina (orbitoïdés) du tertiaire.



Ce sont des foraminifères benthiques. Cette évolution porte sur l'embryon qui est formé de deux loges appelées protoconque et deutéroconque. L'évolution correspond à l'embrassement progressif de la protoconque par la deutéroconque. Ce paramètre peut être quantifié et exprimé en degrés d'embrassement.

2\ Exemple d'évolution.

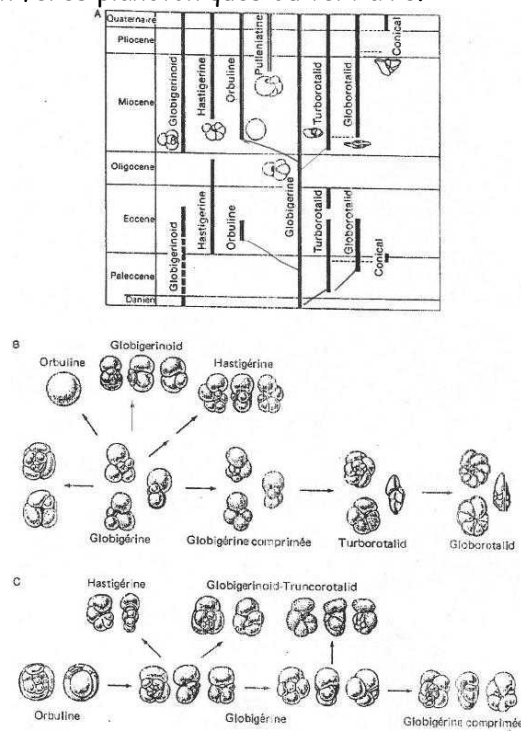
L'évolution s'accompagne d'un accroissement de la taille de l'embryon. Cela permet une augmentation des possibilités de dispersion. La même évolution a été observée en Amérique, en Asie et en Australie mais, ces mêmes tendances évolutives apparaissent avec de forts décalages chronologiques.



Aux Etats-Unis, on trouve une valeur de 49,4 vers 50 millions d'années et 139,2 vers 32 millions d'années. En Asie, on trouve 87,3 vers 30 millions d'années et 132 vers 24 millions d'années. ➔ Cette évolution se fait dans des domaines géographiques distincts. On peut trouver des anagenèses itératives dans une même région, soit par des adaptations plus ou moins rapides au même biotope, soit par le relais de lignées successives.

B\ Cladogenèse itérative.

L'exemple des foraminifères planctoniques du tertiaire.



A : Répartition stratigraphique des diverses formes ; B : Evolution au Néogène à partir de Globigérines ancestrales ; C : Evolution comparable à l'Eocène.

Fig. 35. Exemple d'évolution itérative :
variation de la morphologie des Foraminifères planctoniques au cours du Tertiaire.

Attention, cet exemple porte sur des genres différents, c'est donc plutôt de la macroévolution.

On peut distinguer deux grandes crises biologiques : la crise crétacé-tertiaire et la crise de la limite éocène-oligocène. On observe deux fois le même modèle évolutif. On part d'un type de base, non spécialisé : Globigérine. A partir de là, plusieurs lignées se différencient (ce sont des adaptations aux profondeurs d'eau) :

- Type Orbuline : c'est une sphère, adaptée à la surface.
- Forme carénée et conique : Globorotalid, adaptée à la profondeur.

La seconde alvéole est plus accomplie que la première.

Cette diversification, liée à la spécialisation à des environnements différents est appelée « radiations adaptatives ». Elles peuvent se répéter plusieurs fois au cours des temps.

C\ Conclusion.

Ces exemples d'évolution itérative prouvent qu'il y a une certaine orientation dans l'évolution : c'est « l'orthogenèse ».

On observe cette direction car l'évolution est un compromis entre les potentialités des organismes et les contraintes mécaniques de l'environnement : « prédétermination de l'évolution ».

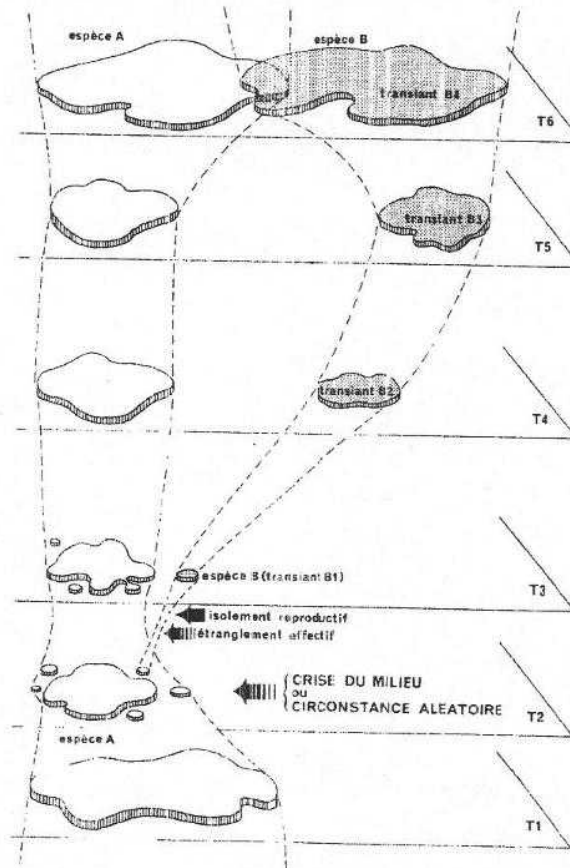
La spécialisation dans un milieu demande un certain type d'évolution car il n'y a pas de nombreuses solutions.

Les modalités de la spéciation.

La spéciation est la création d'espèces.

Il existe différents modèles théoriques en fonction des conditions géographiques.

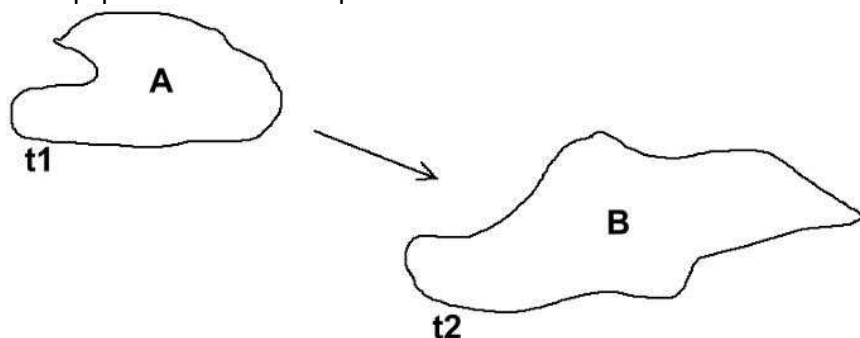
- La spéciation péripatrique.



Dans ce cas, la création d'une nouvelle espèce se fait par isolement d'une population périphérique dans l'aire de peuplement de la population initiale.

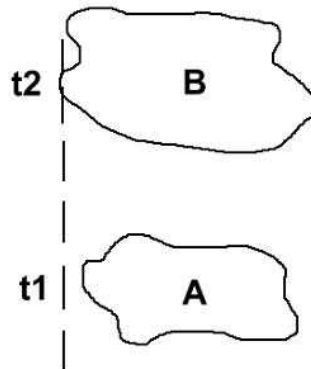
- La spéciation allopatrique.

C'est la création d'une nouvelle espèce par migration d'une population ou par une division géographique de la population en deux espèces.



- Spéciation sympatrique.

Il y a création d'une nouvelle espèce, sur place.



I\ Spéciation péripatrique.

Ce type de spéciation est le plus fréquent. La création de la nouvelle espèce passe par trois phases principales.

A\ Phase de désorganisation du pool génétique.

Voir t2 du premier schéma du chapitre.

De petites populations sont séparées par des circonstances exceptionnelles ou aléatoires, ou par des modifications générales du milieu.

La population se trouve très réduite (un microdème) et ne renferme qu'une petite partie du patrimoine génétique. Ces populations sont en général déstabilisées puis s'éteignent.

Parfois, elles parviennent à survivre en se restructurant.

B\ Phase de restructuration et d'isolement reproductif.

La restructuration chez de petits effectifs est une propagation rapide de cet effectif et des modifications sur les populations.

La restructuration a surtout lieu au niveau génétique, par mutation et recombinaison sur des gènes structuraux ou régulateurs, ou bien, au niveau chromosomique (fusion, fission, inversion).

Ces changements ont des implications au niveau biochimique, physiologique (métabolique) et du développement (ontogénétique).

D'autres implications, externes, au niveau écologique, ou au niveau éthologique (comportement).

Ces modifications entraînent l'isolement reproductif. Cette étape est très brève et porte sur des microdèmes.

En conséquence, on ne trouvera pas de témoignage fossile.

C\ Phase de réorganisation après l'isolement reproductif.

La restructuration peut se poursuivre avec des changements morphologiques importants, alors que se régénèrent des populations à gros effectifs, des macrodèmes. L'isolement géographique n'est plus nécessaire.

La durée de cette phase est très variable :

- Elle est inexistante chez les espèces jumelles.
- Elle est longue dans certains cas et c'est alors une évolution graduelle (anagenèse) qui adapte progressivement la nouvelle espèce à son milieu.

Cette phase serait essentiellement contrôlée par les déplacements au cours des temps des différents stades de croissance. C'est cette phase que l'on observe généralement en paléontologie.

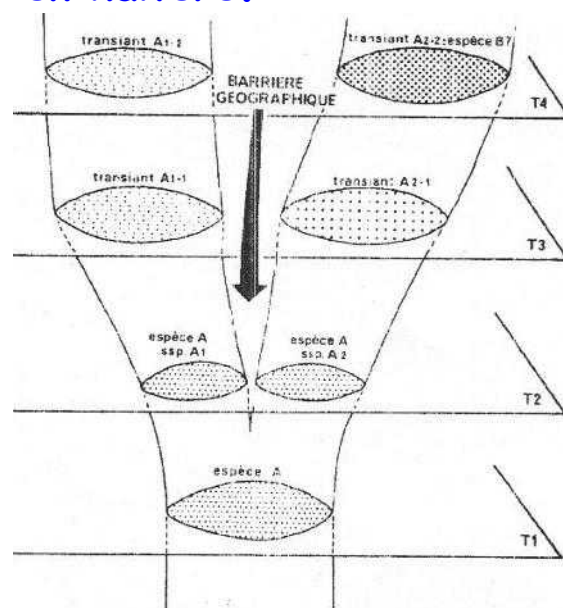
L'espèce va avoir trois devenir possibles :

- L'environnement est stable. L'espèce est en équilibre avec son milieu, il n'y a pas dévolution (stase).
- L'environnement change modérément. Il n'y aura pas de grande diminution des effectifs. On a alors une nouvelle anagenèse sans isolement reproductif.
- Le milieu subit des changements importants. Il va y avoir isolement de petites populations, c'est un nouveau cycle qui commence. On a de nouveaux microdèmes qui subiront une nouvelle phase de spéciation.

II\ La spéciation allopatrique.

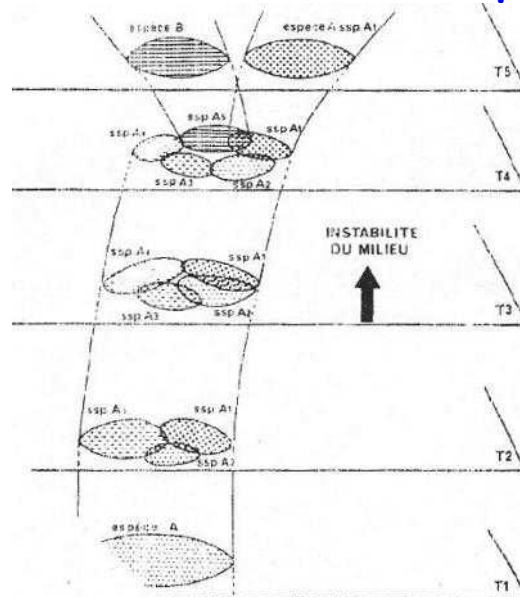
Ce type de spéciation affecte les macrodèmes.

A\ Contrôle en haltère.



Une espèce à grande répartition géographique va se scinder en deux ensembles par création d'une barrière géographique. Les échanges de gènes vont être interrompus. Si les conditions de milieu sont différentes pour les deux groupes, on passe directement à la phase 3 (réorganisation et restructuration). Les deux populations vont diverger graduellement en faisant une cladogenèse. On obtiendra alors des sous-espèces différentes (ou races géographiques) mais à la longue, on pourra obtenir des espèces différentes qui ne peuvent plus se croiser.

B\ Le modèle de chaîne des sous-espèces.

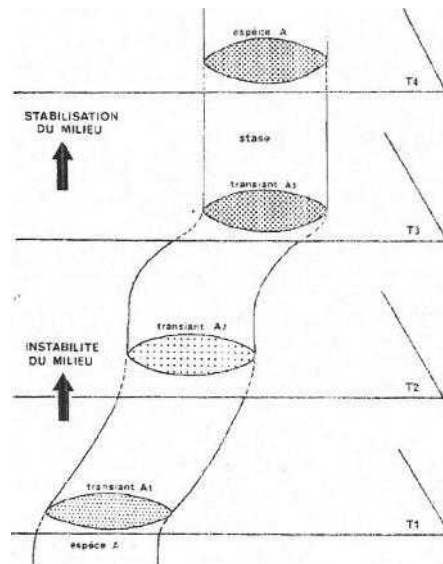


Dans une espèce, se crée, par des migrations et par des étapes successives, des sous-espèces à effectifs comparables.

Ces sous-espèces ont des petites différences génétiques. Avec le temps, les différences s'accumulent et, à la longue, elles peuvent aboutir à la disparition de l'interfécondité dans un des groupes qui devient alors une espèce distincte.

III\ La spéciation sympatrique.

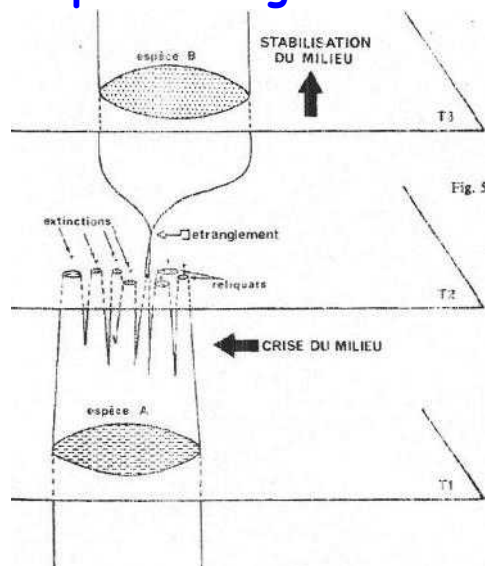
A\ L'anagenèse.



On a une lignée ou un milieu qui devient instable. Si les effectifs ne se divisent pas, on a directement la phase 3 de réorganisation jusqu'à ce que l'espèce retrouve un nouvel équilibre.

→ C'est une évolution graduelle.

B\ La spéciation par étranglement.



Le milieu subit une crise importante qui crée une fragmentation brutale en plusieurs microdèmes résiduels. Généralement, ils disparaissent tous au bout d'un moment.

Parfois, une des populations donne naissance à une nouvelle espèce par l'enchaînement des trois phases de la spéciation.

→ C'est l'évolution quantique.

IV\ Conclusion.

La spéciation comprend fondamentalement trois phases (A, B, C). Cette séquence implique :

- Une variation des effectifs (faibles en 1 et 2 ; forts en 3).
- Des durées variables (courtes en 1 et 2 ; longue en 3).

Ces variations sont contrôlées par le milieu extérieur qui détermine les modalités de la spéciation.

Les processus ontogénétiques dans l'évolution.

Ces processus forment un lien entre le développement de l'individu et la lignée phylogénique.

I\ Ontogenèse et phylogenèse.

A\ La coquille d'un céphalopode actuel.

Exemple : le nautilus.

Le nautilus est un animal qui vit dans sa dernière loge (chambre d'habitation). L'avant-dernière est remplie d'eau et de gaz ; les autres sont remplies d'air.

Au stade embryonnaire, l'animal vit dans sa protoconque (première loge). En grandissant, il va créer sa coquille en sécrétant à l'arrière de son corps, des cloisons successives.

→ Le nautilus garde intactes, jusqu'à la fin de sa vie, toutes les phases de croissance de sa coquille. On peut y retrouver des stades embryonnaires, juvéniles, adultes et même séniles.

Il en est de même pour les ammonioïdes.

B\ Les sutures des ammonioïdes.

Les sutures des ammonioïdes sont plissées. Elles sont toujours successives sur une même coquille.

Sur les formes les plus anciennes (agoniatites), on trouve trois lobes fondamentaux (les protolobes).

Chez les espèces un peu plus évoluées (koenenites), on voit qu'il apparaît au stade adulte, des lobes complémentaires (les métalobes) qui se développent au dépend de la selle (ombilicale, latérale). Lobes et selles sont simples.

Sur les prolecanitida, les métalobes se multiplient et commencent à être denticulés (suture-type cératite).

Chez les ceratitida (permien-trias), les denticulations des lobes s'accroissent et peuvent même atteindre les selles.

Les ammonioïdes du jurassique et du crétacé présentent des lobes et des selles qui sont denticulés avec des éléments généralement nombreux.

Les koenenites présentent une seconde cloison qui n'a que les trois protolobes, identiques aux agoniatites adultes.

Chez lytocératidea (crétacé-jurassique), la seconde cloison a des lobes et des selles non découpées, à éléments peu nombreux : peu de protolobes et de métalobes. Sur la 9^{ème} cloison, on constate que le lobe commence à se denticuler. Cette denticulation va gagner les lobes et toutes les selles.

→ La coquille d'un individu reprend l'histoire de la suture des ammonioïdes.

C\ Ontogenèse.

Chez les ammonoïdés primitifs, le goulot est rétrosiphonné. Chez les formes plus évoluées, le goulot est prosiphonné (vers l'avant).

On connaît au permo-trias, une ammonite (tropite) où le goulot est rétrosiphonné sur les premières cloisons et devient prosiphonné par la suite.

D\ Synthèse.

Il existe un parallélisme entre le développement d'un organisme à ses divers stades de croissance et les étapes successives de l'histoire d'une lignée.

Haeckel : « L'ontogenèse récapitule la phylogénie ». (Bof !)

→ La phylogenèse correspond à la succession de séquences ontogénétiques.

II\ Définition et identification de l'ontogenèse.

Ontogenèse : processus permettant le passage du génotype au phénotype jeune puis au phénotype adulte.

En paléontologie, on ne connaît pas le passage « génotype → phénotype jeune ». Toutefois, on connaît le passage « phénotype jeune → phénotype adulte » et la succession des phénotypes au cours des temps géologiques.

On va analyser l'ontogenèse en comparant des jeunes et des adultes qui se succèdent au cours des temps.

Trois paramètres sont utilisés :

- Morphologie et taux de changement.
- Age biologique : intervalle entre la fécondation et la vie qui est étalonné par un événement comme la naissance, l'acquisition de la maturité sexuelle et la fin de la croissance.
- Taille et taux de croissance. En général, la taille est étroitement corrélée avec l'âge : évolution de l'âge relatif.

On étudie l'ontogenèse en analysant les modifications au cours des temps entre la taille et la morphologie.

III\ Modification ontogénétique et rôle dans l'évolution.

A\ Le nanisme et le gigantisme.

Nanisme et gigantisme sont deux modifications du taux d'accroissement de la taille : réduction ou augmentation du volume corporel maximal sans modification de l'âge et de la forme. (la maturité sexuelle arrive au même moment).

Exemple : Leithera, cerf de Crête.

Durant le quaternaire, dans les îles de la méditerranée par rapport aux animaux continentaux, les petits mammifères sont plus grands et les grands mammifères de ces îles sont plus petits que les grands mammifères continentaux.

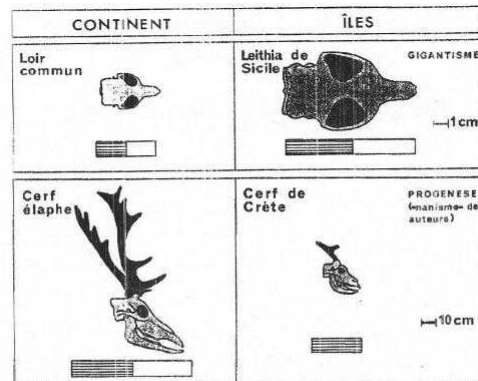


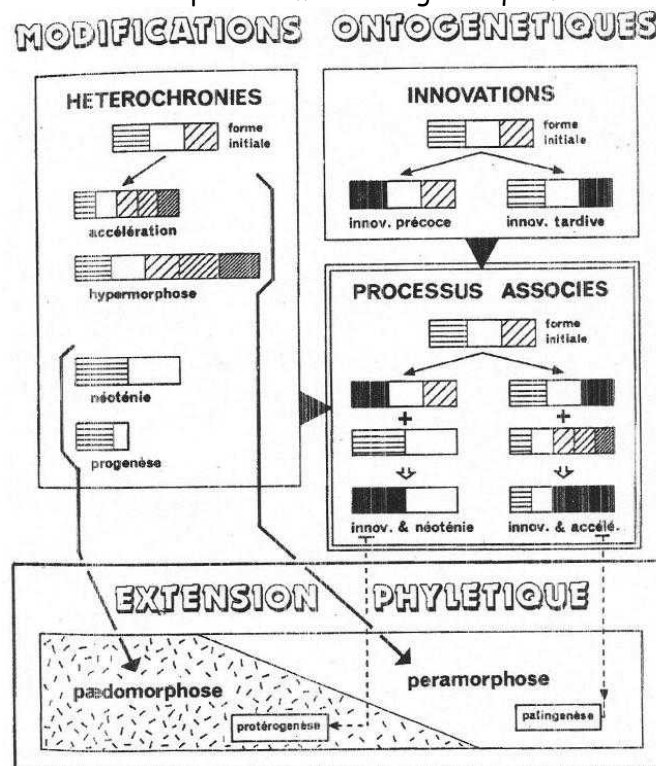
Fig. 1 — Nanisme et gigantisme.
Comparaison des mammifères des îles méditerranéennes (Sicile, Crête...) avec des formes continentales apparentées.
Cadre supérieur : le rongeur géant de Sicile (*Leithia medietensis*) comparé au loir commun (*Glis glis*).
Cadre inférieur : le petit cerf de Crête (*Megaceros*) comparé à la forme continentale (*Cervus elaphus*) ; cet exemple, également interprété par les auteurs comme un cas de nanisme, est en réalité une progénèse (figure réalisée d'après les dessins de Perizonio, 1970). Les cartouches sont construits sur le modèle initial et expliqué pour le tableau 1.

Le cerf de Crête est deux fois plus petit mais il a aussi une forme différente.

B\ Les hétérochronies du développement.

Les hétérochronies de ce type sont des décalages qui altèrent la séquence ontogénétique d'un descendant par rapport à son ancêtre. Si un groupe de gènes entre en action à un moment différent de l'ontogénèse, le phénotype sera modifié. Une hétérochronie se manifeste par un déplacement ou l'apparition d'un caractère entre l'ancêtre et les descendants.

De tels mécanismes peuvent provoquer de manière quasi-instantanée des transformations morphologiques importantes avec de petites mutations génétiques.



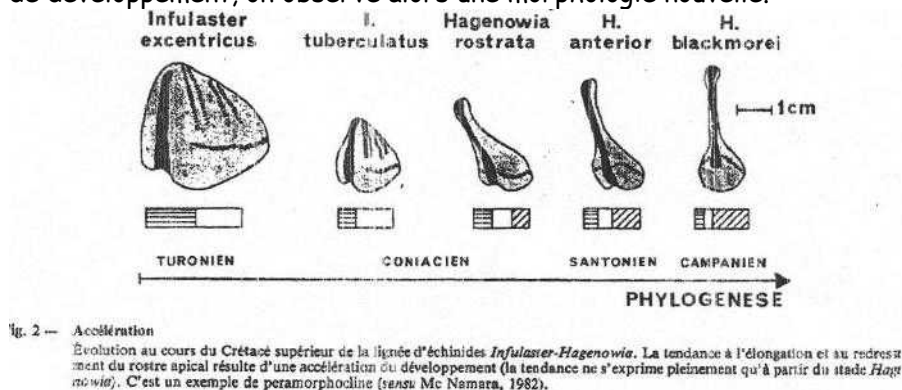
Tabl. 1 — Les principales modifications de l'ontogénèse (hétérochronies, innovations ou processus associés) et leur extension phylétique. Les modifications ontogénétiques (partie supérieure du tableau) correspondent à des processus qui aboutissent à des résultats morphologiques (expressions phénotypiques). Ces résultats (paedomorphose, peramorphose) peuvent être notamment perçus dans une perspective phylétique (partie inférieure du tableau). Les cartouches horizontales symbolisent le déroulement de l'ontogénèse. Leur longueur est proportionnelle à la taille de l'adulte ; à l'intérieur les différents figurés (de gauche à droite : rayures horizontales, blanc, rayures obliques) représentent la succession des stades ontogénétiques. Le figuré noir est réservé aux innovations. Les concepts anciens de paléogénèse et protérogénèse apparaissent ici comme des cas particuliers de paedo- et peramorphose (d'après David, 1985, modifié).

1\ L'accélération et la néotémie.

Dans le cas d'une accélération ou de néotémie, il y a uniquement une modification du taux de changements de forme. La taille adulte est la même que chez l'adulte ascendant. La fin de la croissance se fait sûrement au même âge biologique. Le développement somatique va être accéléré ou ralenti.

Une accélération provoque un développement plus rapide. L'ensemble des étapes de croissance de l'ancêtre est condensé en un stade du développement du descendant.

En fin de développement, on observe alors une morphologie nouvelle.

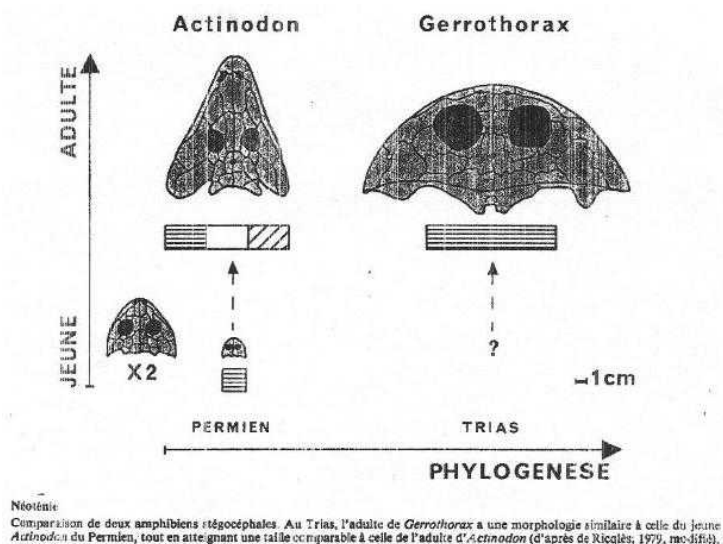


Exemple : inflaaster Hagenovia.

Globalement, l'animal a la même taille. À volume égal, c'est la morphologie qui change.

La néotémie : c'est le développement somatique qui est ralenti. Les stades juvéniles d'ancêtres restent à l'état adulte des descendants → les derniers stades du développement vont disparaître.

Exemple : Actinodon/Gerrothorax.



Actinodon, au stade adulte, a un crâne qui devient allongé. Le descendant (*Gerrothorax*), au stade adulte, a son crâne qui est élargi.

2\ L'hypermorphose et la progenèse.

Hypermorphose et progenèse sont des hétérochronies qui affectent l'âge. Le moment de la maturité sexuelle et la fin de la croissance sont décalés (chez les descendants).

Ici, il y a retardement : la taille atteinte par l'adulte descendant est plus grande que celle des ancêtres.

La progenèse : la maturité sexuelle est avancée : l'adulte descendant sera plus petit que l'adulte ancestral.

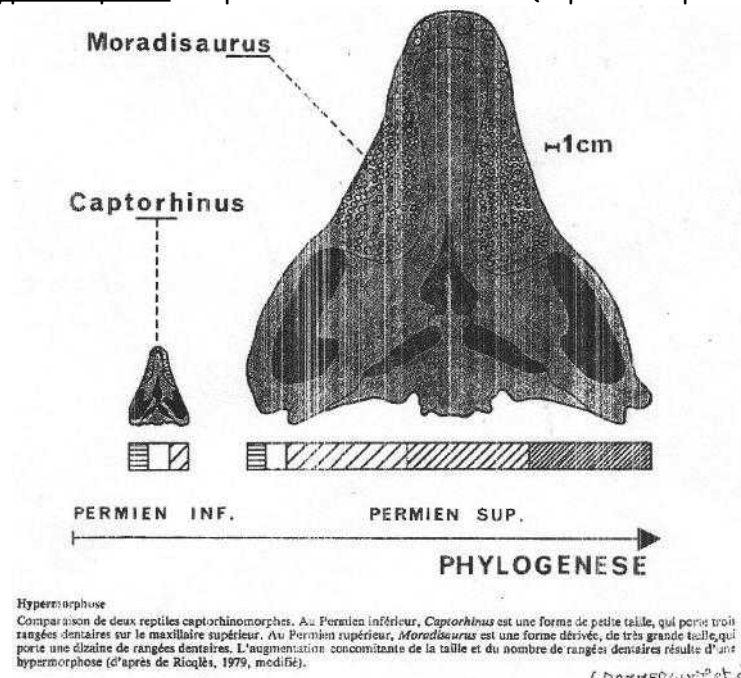
L'hypermorphose provoque une augmentation de la croissance et un allongement de la vie.

La progenèse va entraîner une diminution de croissance accompagnée d'une diminution de la durée de vie.

Ces deux phénomènes ont respectivement :

- Les mêmes effets sur la morphologie que l'accélération et la néotémie.
- La corrélation taille/forme est inchangée pour accélération et néotémie alors que pour l'hypermorphose et la progenèse, le changement de forme s'accompagne d'un changement de taille.

Exemple d'hypermorphose : Captorhinus/Moradisaurus (reptiles du permien).



Au permien inférieur, on trouve captorhinus, reptile de petite taille avec 3 à 4 rangées de dents sur les maxillaires supérieurs.

Au permien supérieur, son descendant est Moradisaurus qui a une plus grande taille et une dizaine de dents sur les maxillaires supérieurs.

On constate que chez Captorhinus, la durée de vie est plus courte (ossification incomplète). Chez Moradisaurus, cette ossification est plus complète : sa vie est donc plus longue.

→ L'augmentation de la durée de vie est réalisée avec l'apparition d'une ou plusieurs tranches supplémentaires d'ontogénèse.

Exemple de progenèse : oursins, Clypeasteroïdés.

Ces oursins descendent des cosiduloïdés (mésozoïque) à vie enfouie (sédiments vaseux), sans mâchoire à l'état adulte. Le premier représentant des clypeasteroïdés est un petit oursin (identique à un jeune casiduloïdé) et pourvu de dents à l'état adulte. L'évolution les fait ensuite vivre sur les sédiments.

Ces quatre hétérochronies peuvent être regroupées en deux modes :

- La pérarmorphose.

La maturité sexuelle et l'arrêt de la croissance apparaissent à des stades plus tardifs du développement somatique. On aboutit à des « hyper adultes ». La séquence ontogénétique du descendant récapitule la phylogénèse : c'est dans le descendant juvénile que l'on trouvera l'image de l'ancêtre adulte. Ce mode correspond à des évolutions à long terme (très fréquentes) et qui réalisent progressivement les potentialités d'une lignée.

- La pédomorphose.

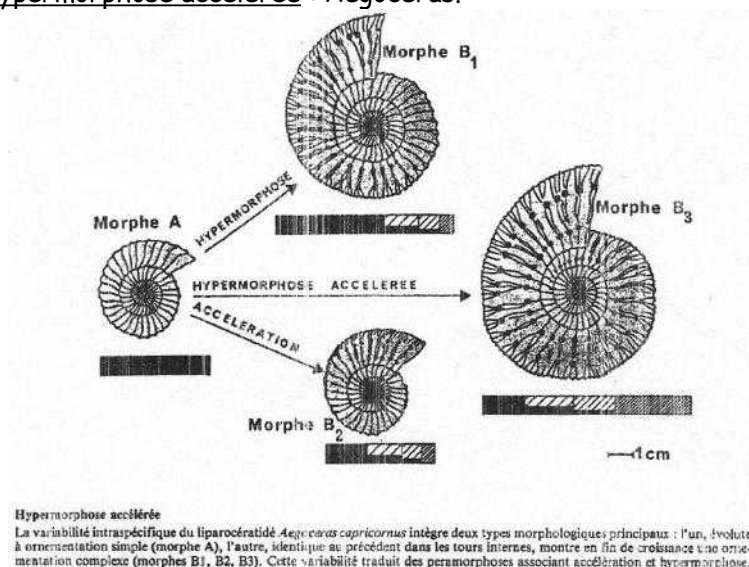
La maturité sexuelle arrive à des stades plus précoces du développement somatique. La séquence ontogénétique de la forme ancestrale annonce les étapes futures de la phylogénèse. Le descendant adulte donne l'image de l'ancêtre juvénile : « récapitulation inverse ». Cette évolution ne joue que sur un court terme. Elle peut permettre de relancer l'évolution par une spéciation dans une autre direction.

3\ Les associations d'hétérochronies.

Toutes ces hétérochronies peuvent se combiner du fait de l'indépendance possible du développement germinal par rapport au développement somatique. On a quatre combinaisons possibles :

- Progenèse néotémique. On associe la plus grande précocité de la maturité sexuelle à un développement somatique ralenti.
 - Hypermorphose accélérée. On associe un retard de la maturité sexuelle à une accélération des diverses phases de développement.
- Ces deux combinaisons ont un effet amplificateur.

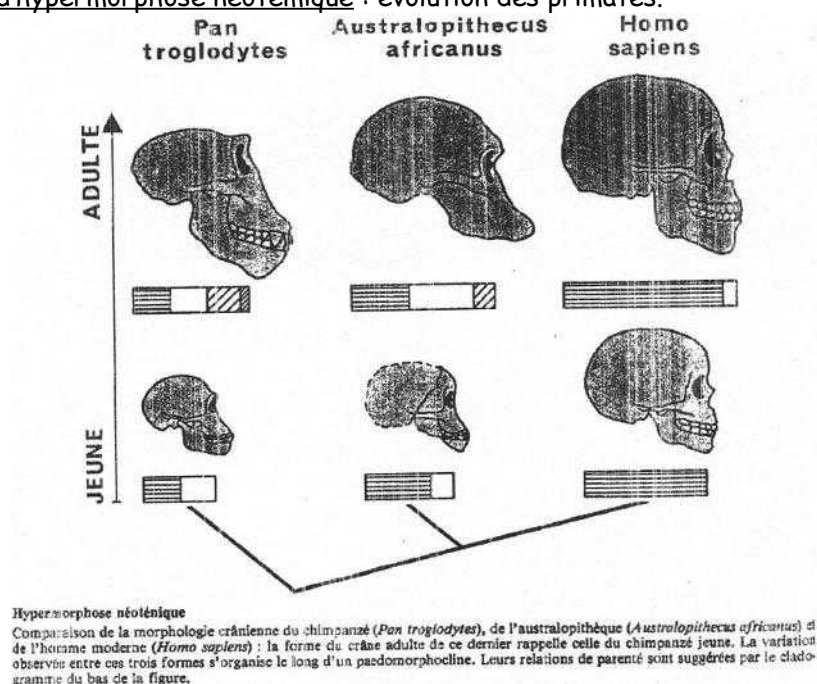
Exemple d'hypermorphose accélérée : Aegoceras.



L'ancêtre a une coquille à côtes simples. Les descendants ont une ornementation plus complexe (tubercules et côtes subdivisés).

- Progenèse accélérée. La plus grande précocité de la maturité sexuelle (diminution de l'âge) est associée à un raccourcissement des diverses phases de développement du corps.
- Hypermorphose néotémique. On prolonge l'âge biologique par un retard de la maturité sexuelle et on l'associe à un développement somatique ralenti.

Exemple d'hypermorphose néotémique : évolution des primates.



Le jeune chimpanzé et l'australopithèque ont un crâne arrondi avec un os frontal redressé et des mandibules de petite taille. Au cours de la croissance, le crâne devient de plus en plus anguleux avec la mandibule de plus en plus forte.

Chez l'homme, la morphologie du crâne ne se modifie pas : l'état adulte rappelle la morphologie juvénile de « l'ancêtre ». → C'est une néotémie.

Toutefois, il se produit parallèlement chez l'Homme, une augmentation générale de la taille, due à une croissance prolongée et un retard de la maturité sexuelle (et un allongement de la durée de vie).

4\ Les innovations.

Les innovations correspondent à l'apparition, chez les descendants, de caractères morphologiques nouveaux, qui n'étaient pas connus chez l'ancêtre et qui supplantent les caractères ancestraux d'une des phases du développement.

Les causes peuvent être :

- La traduction sur le génotype d'une modification du génotype.
- Le réveil d'un caractère génotypique masqué.

α\ Innovation précoce.

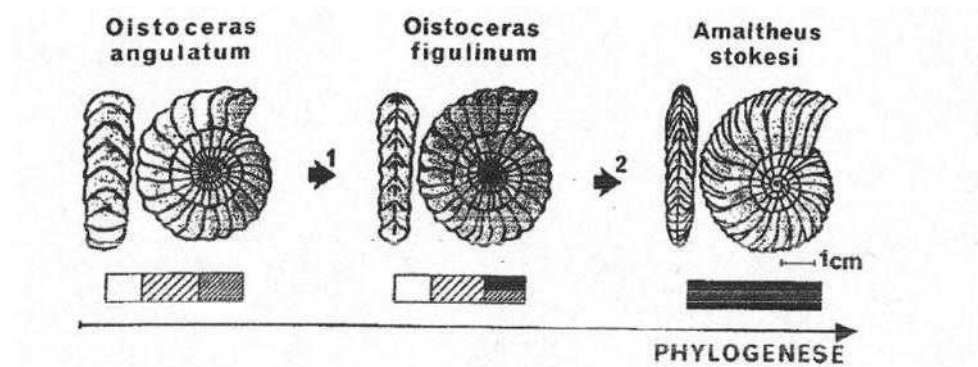
Dans ce cas, un caractère nouveau apparaît au début du développement.

Exemple : *Liparoceras*, *Beaniceras*.

Liparoceras est une ammonite avec des tubercules et des côtes subdivisées, et ceci, à tous les stades du développement. Il en descend le genre *baeniceras*.

Dans les premiers tours, les côtes sont simples (juvéniles) et au stade adulte, apparaît une ornementation plus complexe.

β\ Innovation tardive.



Innovation tardive et accélération

Principales étapes de l'évolution conduisant des liparocératidés capricornes aux amalthées. La carène cordée et la costulation bifurquée apparaissent en fin de croissance chez *Oistoceras figulinum* (cette innovation tardive est figurée en noir). Ce caractère gagne ensuite la totalité du développement par accélération chez *Amaltheus stokesi*.

Le nouveau caractère apparaît à la fin de la croissance.

Exemple : *Oistoceras* (ammonite).

L'ancêtre possède des côtes simples qui se continuent sur le bord externe.

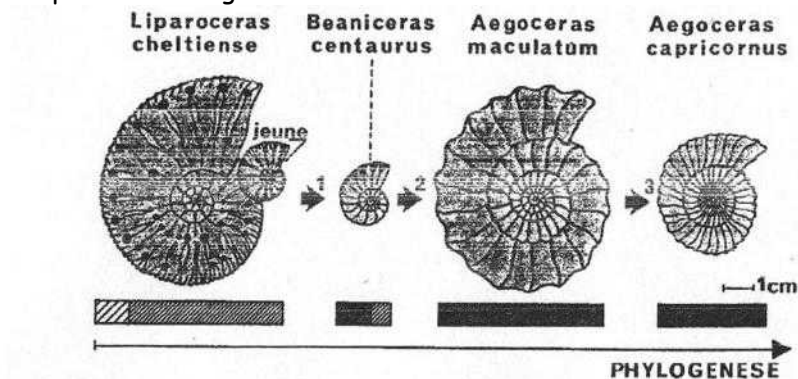
Chez certains descendants, on voit chez les adultes, un redoublement des côtes et l'ébauche d'une carène.

5\ Les associations : innovations-hétérochronies.

Les hétérochronies peuvent atténuer les effets des innovations. Cela se produit dans le cas où l'on associerait une accélération avec une innovation précoce et une néotémie avec une évolution tardive. Les effets d'accentuation sont obtenus dans le cas : d'une néotémie associée avec une innovation précoce ou d'une accélération avec une innovation tardive.

α \ Néotémie + innovation précoce.

Exemple : *Liparoceras*/*Aegoceras*.



Innovation précoce et néotémie

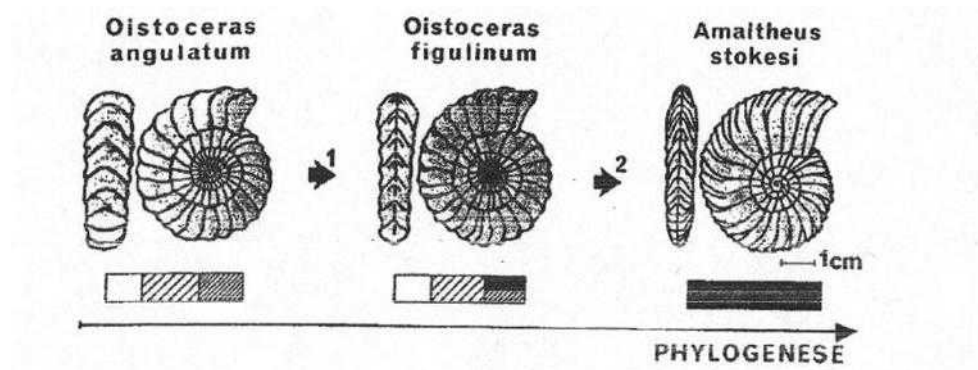
Principales étapes de l'évolution de la lignée des liparocératidés capricornes. Le caractère capricorne (côtes simples et coquille éolue) apparaît brutalement dans les tours internes de *Beaniceras centaurus* (cette innovation précoce est figurée en noir). Il gagne ensuite la totalité du développement par néotémie hypermorphique chez les *Aegoceras*.

L'innovation des côtes simples gagne sur l'ensemble de la coquille dans le genre *Aegoceras*.

β \ Accélération + innovation tardive.

Le raccourcissement des premiers stades de l'ontogenèse permet à l'innovation tardive de s'étendre jusqu'à des stades précoces du développement.

Exemple : *Oistoceras*/*Amaltheus*.



Innovation tardive et accélération

Principales étapes de l'évolution conduisant des liparocératidés capricornes aux amalthées. La carène cordée et la costulation bifurquée apparaissent en fin de croissance chez *Oistoceras figulinum* (cette innovation tardive est figurée en noir). Ce caractère gagne ensuite la totalité du développement par accélération chez *Amaltheus stokesi*.

Les côtes sont dédoublées et gagnent sur toute la coquille.

6\ Hétérochronies et rythmes d'évolution.

Les accélérations, les hypermorphoses et les néotémies s'enchaînent de manière continue et donnent des évolutions graduelles (ou adaptatives).

La progenesis a lieu dans des cas d'événements isolés, accidentels, qui coïncident avec des crises à partir desquelles vont se développer d'autres tendances : évolution quantique. Ce sont les causes des changements fondamentaux et elles sont à la source des grandes lignées. → Evolution narratrice.

Synthèse : Evolution et Milieu.

L'évolution est la réponse de la vie, avec des essais avortés ou réussis, à la pression du milieu. Dans le milieu, on distingue deux aspects :

- L'aspect d'un milieu extérieur à l'espèce : milieu physico-chimique et biotique.
- L'aspect d'un milieu intérieur à l'espèce : la concurrence entre les individus crée la sélection naturelle.

Si le milieu est stable, la population est stable (stase) ou elle subit une pression orientée (auto-sélection) qui va créer une anagenèse.

Si le milieu est instable, on a des crises, des évolutions irrégulières et des cladogenèses.

I\ Evolution et mode de vie.

- Le plancton.

En milieu marin, le plancton a une évolution continue, régulière où il vit avec une masse d'eau ayant des caractéristiques physico-chimiques constantes en se déplaçant avec elle. → Le plancton est placé de manière favorable pour avoir une évolution régulière et continue.

- Le necton.

Le necton a une évolution continue, régulière. Il est susceptible de partir à la recherche d'environnements propices. Il montre effectivement le type d'évolution annoncée.

- Le benthos de plate-forme.

Le benthos de plate-forme présente une évolution irrégulière et saccadée. Il est soumis à un milieu changeant.

- Les peuplements bathyaux ou abyssaux.

Ces peuplements ont une évolution faible ou nulle. Les changements de milieu sont quasi-inexistants. Le milieu est donc très stable avec une faible densité de population. Le taux d'évolution est faible ou nul.

II\ Evolution et stratégie de vie.

Pour survivre, les organismes peuvent adopter deux types de stratégies de vie.

A\ Stratégie « r ».

- Les formes non-spécialisées,
- Le taux de fécondité élevé,

- Rapide renouvellement des générations (maturité sexuelle précoce, courte durée de vie),
- Petite taille.
 - Espèces opportunistes à stratégie de gaspillage, créée par la progénèse.

B\ Stratégie « K ».

Cette stratégie correspond à une exploitation optimale du milieu. Les formes spécialisées ont :

- Des effectifs réduits,
- Un faible taux de fécondité,
- Un renouvellement lent des générations,
- Une maturité sexuelle tardive et une longue durée de vie,
- De grande taille.

→ Ce sont des espèces d'équilibre. Elles sont créées par hypermorphose (retardement de la maturité sexuelle).

C\ Les changements de stratégie.

Les types « r » et « K » sont extrêmes mais il existe tous les intermédiaires et un groupe peut changer de stratégie dans l'espace et le temps pour assurer sa survie.

1\ Changements au cours des temps.

Au niveau de la macroévolution ou de la microévolution, on passe progressivement d'une stratégie « r » à une stratégie « K » : c'est ce qui donne les lois classiques de l'évolution. → Loi d'accroissement de la taille, loi de la spécialisation croissante. C'est le cas des céphalopodes, des alvéolines.

2\ Changements dans l'espace.

Pour une espèce donnée, les milieux qui sont les plus favorables sont occupés par des individus à tendance « K » (= population centrale). Les milieux peu propices sont généralement occupés par des populations à tendance « r » (= population marginale).

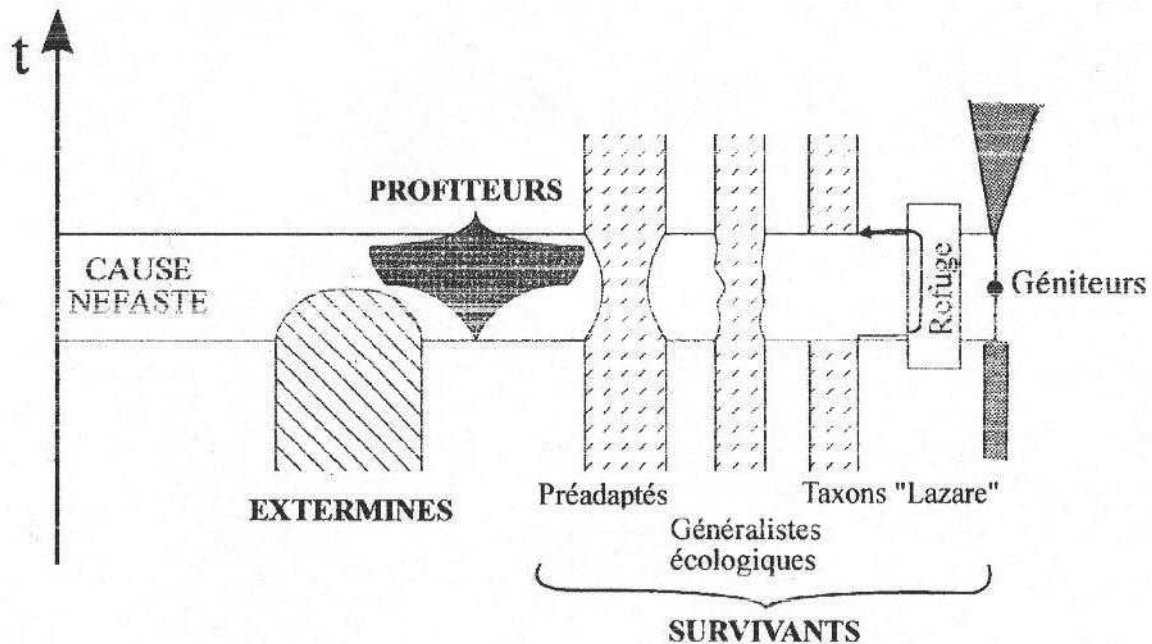
Ce sont les stratégies « r » qui permettent les évolutions de l'espèce.

3\ Changements circonstanciels.

Pendant une période favorable avec un environnement stable, une population favorise la stratégie « K » pour mieux utiliser le milieu.

S'il se produit une crise, c'est à ce moment que la lignée tend alors à adopter la stratégie « r ». L'intérêt de cette stratégie « r » est qu'elle supprime la spécialisation et, en multipliant les générations, elle accroît les possibilités d'innovation et donc, les chances de trouver une bonne réponse aux nouvelles conditions.

III\ Organismes et crises.



Les diverses stratégies sont bien exprimées au moment des crises qui rythment l'évolution : on a alors trois types de comportement :

- **Les exterminées** : ce sont toutes les populations qui sont éliminées (population de stratégie « K »).
- **Les profiteurs** : ils sont rares mais exceptionnellement adaptés aux conditions survenues lors de la crise. Toutefois, ils ne survivent pas à la crise.
- **Les survivants** : ce type présente aussi trois divisions :
 - **Les pré-adaptés** : ils avaient un caractère leur permettant de franchir la crise (exemple : endothermie des mammifères, stratégie « K »).
 - **Les généralistes écologiques** : ils vivent dans n'importe quelles conditions (stratégie « r »).
 - **Les taxons « Lazare »** : ces organismes ont apparemment disparus lors de la crise. Il y a deux possibilités à leur survie. - Les formes de stratégie « K » ont trouvé localement un refuge qui leur a permis de laisser passer la crise (cas des coraux madréporaires pendant la crise K/T). - Les formes ayant persisté en petit nombre en adoptant la stratégie « r » par la progénèse : ce sont les géniteurs qui sont les plus importants d'un point de vue évolutif car ils créent des lignées nouvelles en reprenant progressivement une stratégie « K ».

Partie 2:

Les TP.

Paléontologie. Introduction.

Introduction.

La paléontologie est la science qui étudie les êtres vivants disparus mais aussi les restes de ces êtres vivants. On peut rencontrer différents types de fossiles.

A\ Restes de l'organisme.

1\ Conservation des parties molles.

- Organismes congelés (exemple : mammouth).
- Organismes dans de la résine.
- Inclusions d'organismes dans des cristaux de sel (bactéries).
- Peaux minéralisées.
- Momies dans des tourbières.
- Momies dans des bitumes.

2\ Conservation des parties dures.

- Squelettes.
- Dents.
- Coquilles.
- Carapaces.
- Tests.

3\ Empreintes, moules intérieur/extérieur des parties dures et/ou molles.

- Plumes.
- Ecailles.
- Feuilles.

4\ Conservation de cuticule et de chitine.

5\ Organismes visibles aux rayons X.

6\ Moulages et coupes sériées d'organismes.

→ Anatomie comparée.

B\ Traces d'activité d'organisme fossiles.

- Traces de logement et de déplacement (figures deurbation). Exemple : terrier, tube, galerie, pistes, pas.
- Empreintes de départ d'organismes sur le fond (méduse d'Ediacara).
- Fossilisation d'excréments (coprolithes) : de crustacés, de vertébrés (continentaux : hyènes).
- Coups de griffe de carnivores sur des os.
- Traces de nutrition (perforation d'éponge).
- Traces de protection (lithophages : pholades).
- Pontes fossiles et stades larvaires.
- Fabrications humaines (outils, ...).

C\ Nomenclature et catégories taxonomiques (en latin).

Exemple : Homo sapiens.

Homo est le genre et sapiens l'espèce. Ces deux mots sont suivis du nom de l'auteur et de l'année de la description. Si le nom est entre parenthèse, c'est que le genre a été changé.

Un taxon est un groupe d'organismes qui constituent une unité de la classification des êtres vivants.

Dans l'ordre, on trouve : le Règne, l'Embranchement (ou phylum), la Classe, l'Ordre, la Famille, le Genre et puis l'Espèce.

Les monères (virus, bactéries, cyanophycées) sont des procaryotes.

Les protistes sont des eucaryotes unicellulaires.

Les animaux, mycètes et végétaux sont des eucaryotes pluricellulaires.

Les foraminifères.

I\ Caractéristiques générales.

Les protozoaires sont entourés par un test. Ce dernier est de nature variable, aussi bien que la forme. Sa dimension peut aller de quelques millimètres à 10 centimètres.

Les loges communiquent entre elles par le foramen. La forme de l'ouverture extérieure du test est variable.

On distingue trois types de tests :

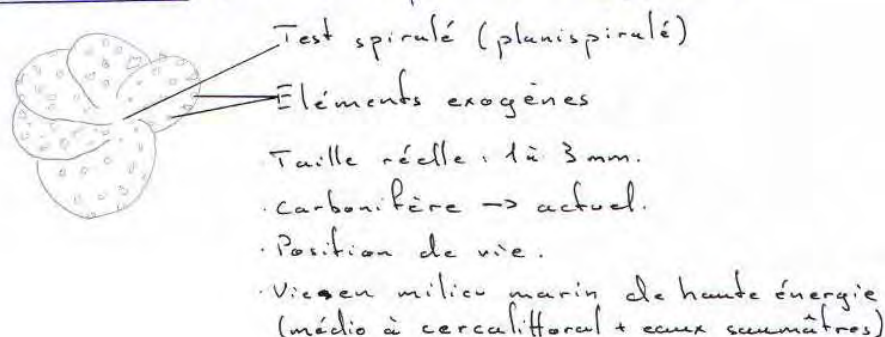
- Les chitiniques : pas de fossile.
- Les agglutinés arénacés : ils récupèrent des fragments de l'environnement avec du calcaire comme ciment.
- Les calcitiques : la calcite est synthétisée par l'animal. On trouve ici plusieurs groupes :
 - les *microgranuleux* qui sont gris, avec des cristaux de calcite de diamètre inférieur à $5\mu\text{m}$;
 - les *porcelanés* de couleur de porcelaine (blanc) avec de la calcite cryptocristalline ;
 - les *hyalins*, à gros cristaux, de couleur miel (brun luisant). Souvent, la muraille est perforée de pores qui permettent la sortie des pseudopodes (distinction entre les perforés et les imperforés).

II\ Les foraminifères benthiques.

A\ Le groupe des Lituolidae (foraminifères benthiques à test agglutiné).

Règne : Animal
Sous-Règne : Protozoaire
Ordre : Foraminifères

- Lituolidae (for. benthique à test agglutiné).



Ils sont millimétriques, à test libre, généralement aplati et spiralé. Ils peuvent être déroulés et montrent une ouverture en bande.

Ils vivent en milieu marin de haute énergie, de médio à cercalittoral mais aussi dans les eaux saumâtres.

On les trouve du carbonifère à l'actuel.

B\ Le groupe des Miliolidae (foraminifères benthiques à test porcelané).

Miliolidae (for. benthique à test porcelané)



- Enroulement planispiralé.
- Taille millimétrique.
- Coquille multiloculaire et globuleuse.
- Originaires de mers chaudes, peu profondes (infralittoral restreint).
- Traces → Actuel.

Leur coquille est millimétrique, porcelanée, libre, multiloculaire et globuleuse.

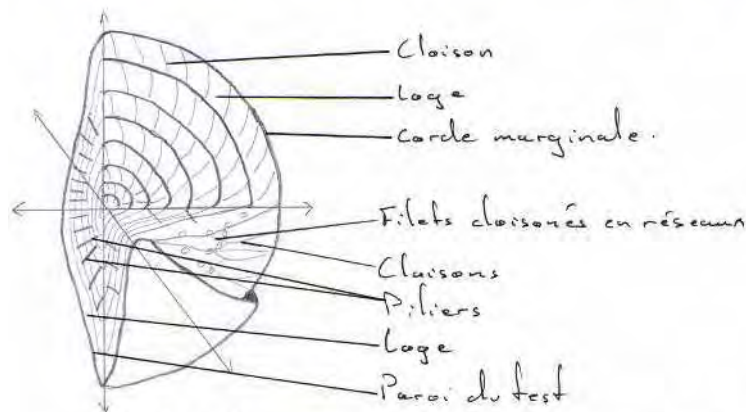
Il y a formation d'une lame calcaire qui s'enroule selon un axe. Les cloisons sont formées parallèlement à l'axe. On obtient alors une grande loge découpée en logettes par des cloisons. La communication, possible, est réalisée par des pores.

Les miliolidae sont originaires des mers chaudes, peu profondes, de milieu infralittoral restreint.

Ce sont des marqueurs du tertiaire et existent du crétacé à l'actuel.

C\ Le groupe des Nummulitidae.

- Nummulitidae (for. plurilobulaire à test distoïdal hyalin)



- Test décarthé.
- Taille : 1-2 cm.
- Milieu de vie marin ouvert (mers chaudes, peu profondes).
- Marqueurs du Tertiaire.

Les Nummulitidae sont plurilobulaires à test distoïdal hyalin. Leur enroulement est le même que celui des Miliolidae mais la spirale est très haute → la lame est subdivisée par des cloisons et le test est renforcé par des piliers.

Leur milieu de vie est marin ouvert et on les trouve dans des mers chaudes, peu profondes.

Ils sont des marqueurs stratigraphiques du tertiaire.

III\ Les foraminifères planctoniques.

Le test de ces foraminifères est hyalin, perforé ou non, libre, pluriloculaire. L'enroulement est trocospiralé. La forme extérieure est variable.

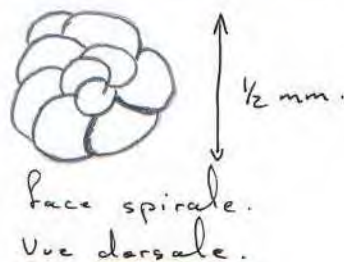
Il y a apparition de côtes (de carènes) au nombre de 1 ou 2 par loge. La face qui présente l'ouverture est la face ombilicale.

On les trouve dans un milieu marin ouvert océanique planctonique.

On distingue deux familles.

A\ Globotruncanidae.

Globotruncanidae



(for. à test trocospiralé).
planctonique.

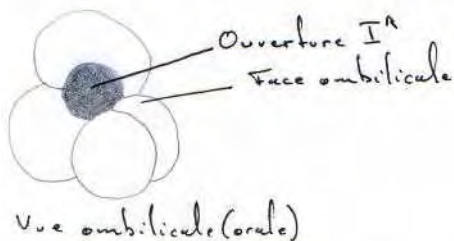
- Chambres angulaires ou pétaloïdes
- Ouvertures sur la face ombilicale (V.)
- Marqueurs du crétacé sup.
- → crise KT (-65 MA)

Le test est trocospiralé, les chambres sont angulaires ou pétaloïdes. Cette espèce présente des carènes. L'ouverture est sur la face ombilicale.

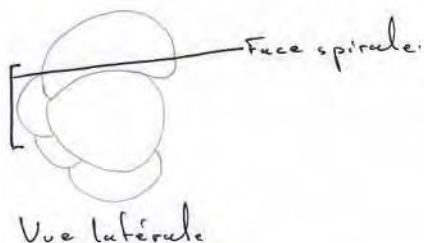
Ce sont de bons marqueurs stratigraphiques du crétacé supérieur. Ils disparaissent il y a 65 millions d'années (crise KT).

B\ Globigerinidae.

- Globigerinidae (for. à test trocospiralé ou lobulaire)
planctonique



- Taille réelle $\frac{1}{4}$ mm
- Chambres sphériques ou ovales
- Grande ouverture
- Test perforé
- Fin crétacé → Actuel.



Le test est trocospiralé ou lobulaire. Les chambres sont sphériques ou ovales. L'ouverture est grande, le test perforé.

Ils apparaissent à la fin du crétacé et durent jusqu'à l'actuel.

Les spongiaires.

I\ Morphologie.

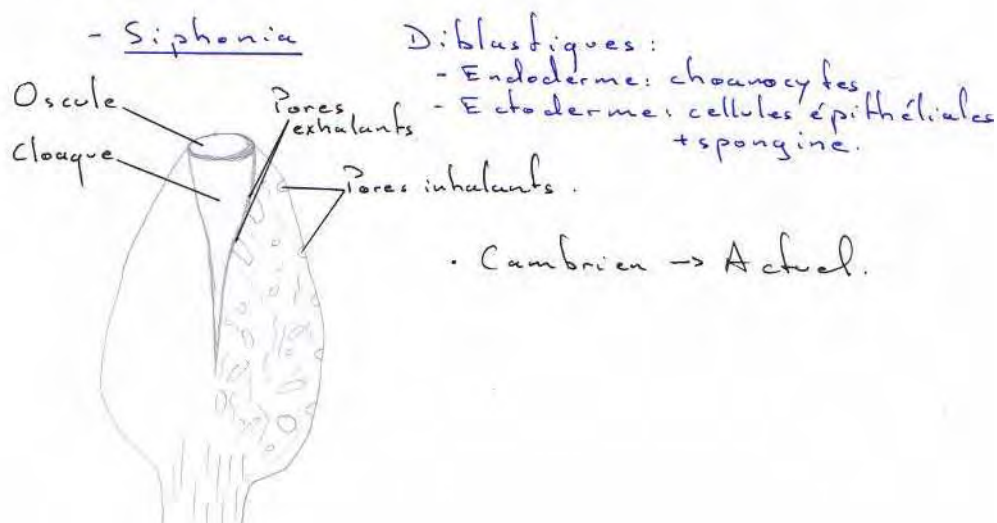
Les spongiaires sont les plus simples des pluricellulaires. Ce sont des diblastiques de taille comprise entre 1mm et 1-2 mètres. Leur forme est extrêmement variable : croûte (substrat), érigé, coupe, éventail.

Ils ne possèdent ni tissu, ni organe, ni symétrie. Leur croissance est fonction du substrat, de la place disponible et du courant.

On peut dire que les spongiaires sont un sac traversé par un courant d'eau continu. L'endoderme est constitué de choanocytes : cils qui entretiennent un courant d'eau qui rentre par le pore inhalant et qui sort par l'oscul (différent du pore exhalant).

L'ectoderme est constitué par des cellules épithéliales avec un remplissage par une matière colloïdale inerte : la spongine.

Règne : Animal
sous-Règne : Métazoaires
Ordre : Spongiaire.



II\ Les types structuraux.

On distingue trois types structuraux différents chez les spongiaires :

- Ascon : sac ouvert en haut par l'oscul.
- Sycon.
- Leucon : caractérisé par la réunion de plusieurs types sycon.

III\ Structures de soutien.

Les structures de soutien sont les spicules, de nature siliceuse ou calcaire. Elles peuvent être seules ou regroupées.

IV\ Classification simplifiée : cf. TP.

V\ Milieu de vie.

On trouve les spongiaires dans les eaux douces, marines, chaudes ou froides, de l'étage médiolittoral à l'abyssal et même, parfois, dans le milieu récifal.

VI\ Intérêt.

Les spongiaires apparaissent au cambrien et durent jusqu'à l'actuel. Ils ont quand même un intérêt stratigraphique.

Les coelentérés.

I\ Morphologie générale.

Les coelentérés sont des diblastiques. Leur cavité générale (coelome) et cavité digestive sont confondues. On trouve une seule ouverture qui tient le rôle de bouche et d'anus.

Ils présentent une symétrie radiaire autour d'un axe qui passe par la bouche. Leurs tentacules sont en nombre variable. Ils sont subdivisés verticalement par des septes. Ils existent sous deux formes : polype et/ou méduse.

II\ Classification simplifiée.

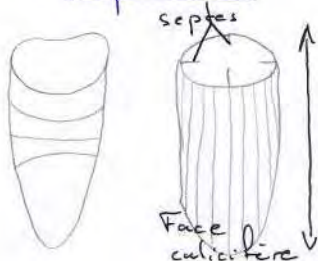
Cf. TP.

III\ Différences morphologiques entre les tétracoralliaires, les hexacoralliaires et les tabulés.

A\ Les tétracoralliaires.

Règne : Animal.
Sous-Règne : Métazoaires.
Ordre : Coelentérés.

→ Tétracoralliaires.
- Zaphrentis.

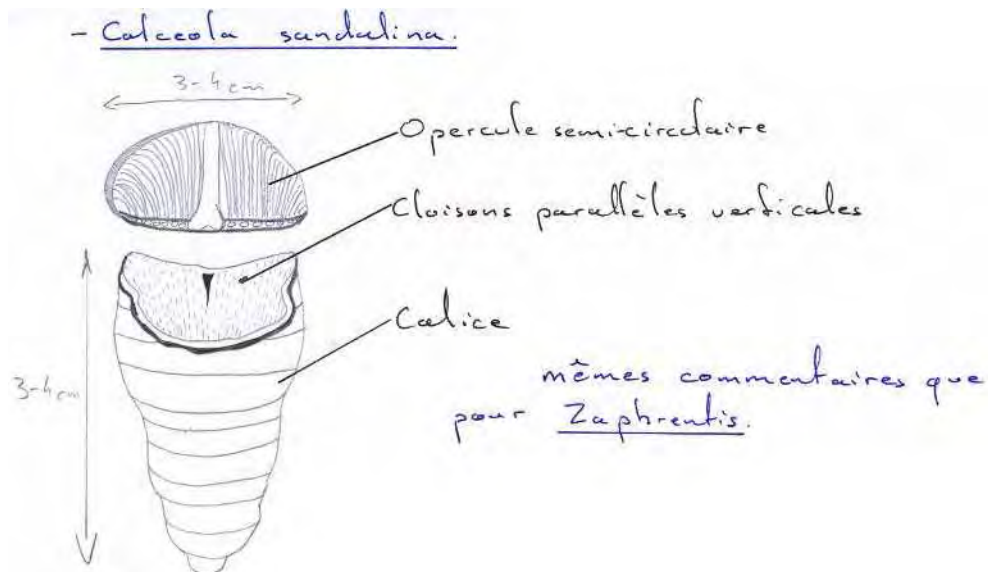


- Diblastiques. Cavité générale (coelome) confondue avec cavité digestive.
- Septes, $n \times 4$.
- Calice fermée par un opercule.
- Cambrien → Permien.

Les tétracoralliaires ont un squelette calcaire avec une symétrie de type 4. Le polypier est divisé intérieurement par des septes en nombre multiple de 4.

La face du côté du calice est appelée « face calicifère ». C'est une face bombée.

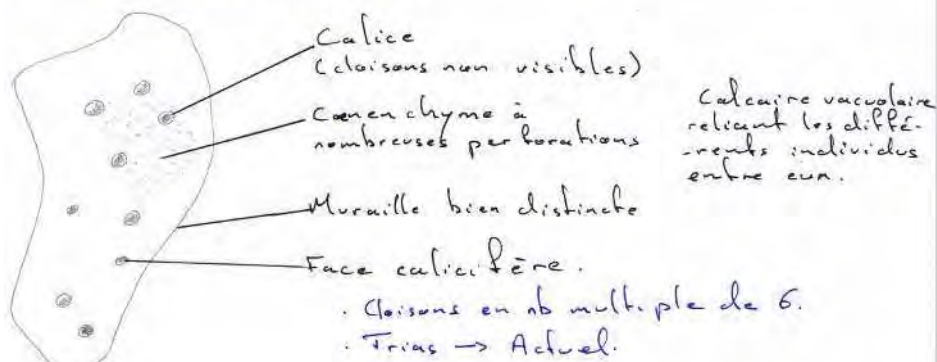
Parfois, le polypier est fermé par un opercule. Ils apparaissent au cambrien et disparaissent au permien. Les cloisons se supportent les unes aux autres.



B\ Les hexacoralliaires.

→ Hexacoralliaires.

Actinacis martiniana.



Astrocoenia

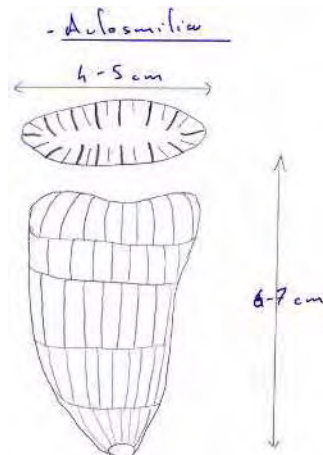


- Calices joints hexagonaux
↳ pas de coenenchyme.
- Cloisons bien apparentées. (Eocène)

Le polypier est en forme de calice. La face supérieure est la « face calicifère ». L'intérieur est divisé par des septes en nombre multiple de 6. Ces hexacoralliaires vont former des colonies (en milieu récifal).

Au niveau de l'endoderme, il y a symbiose entre le polypier et des algues vertes (zooxanthelles).

Ils apparaissent au Trias et continuent jusqu'à l'actuel.

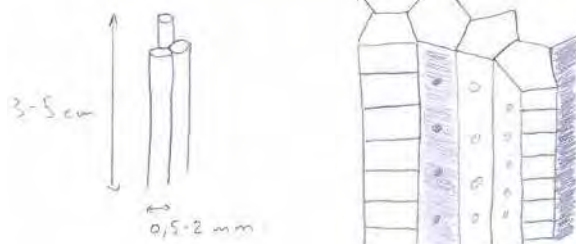


=> Caractéristique d'un hexacorallaire.

C\ Les tabulés.

-> Tabulés.

- Favosites.



- Individus coloniaux, prismatiques
- Communication par des pores
- Limités dans la partie sup.
- Symétrie de type 12.
- Ordovicien -> Paléozoïque

Les tabulés sont toujours coloniaux. Ce sont des individus prismatiques qui communiquent entre eux par des pores ou par des tubes. Ils sont limités dans la partie supérieure du tube.

Ils présentent une symétrie de type 12.

Ils apparaissent à l'Ordovicien et durent jusqu'à la fin du paléozoïque.

IV\ L'intérêt.

Les cœlentérés ont un intérêt paléoécologique important : ils montrent la variation des niveaux marins.

Les brachiopodes.

A\ Morphologie.

Les brachiopodes sont des bivalves, inéquivalves. La ligne de jonction est appelée ligne de commissure. Les valves sont sécrétées par le manteau. L'eau rentre par la parie frontale. Le lophophore sert à la respiration, la nutrition, l'excrétion, le stockage des graisses et de poche incubatrice.

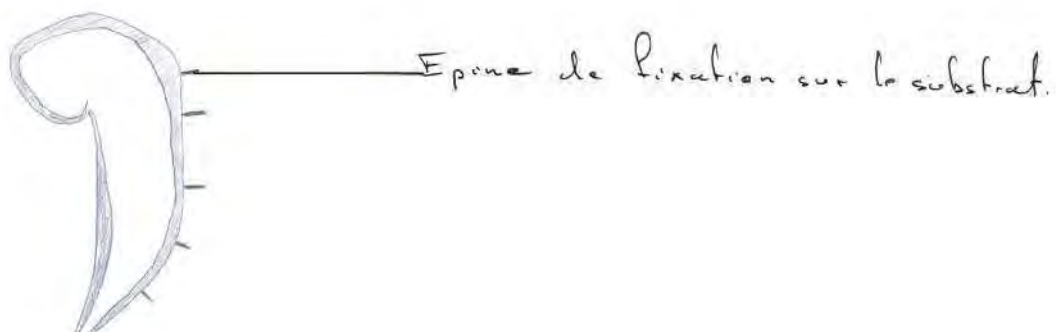
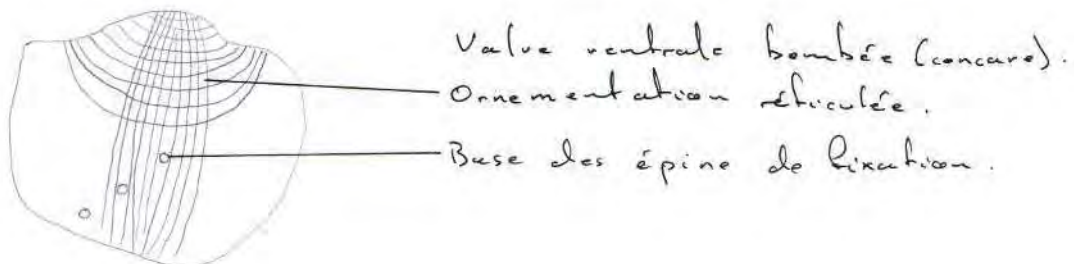
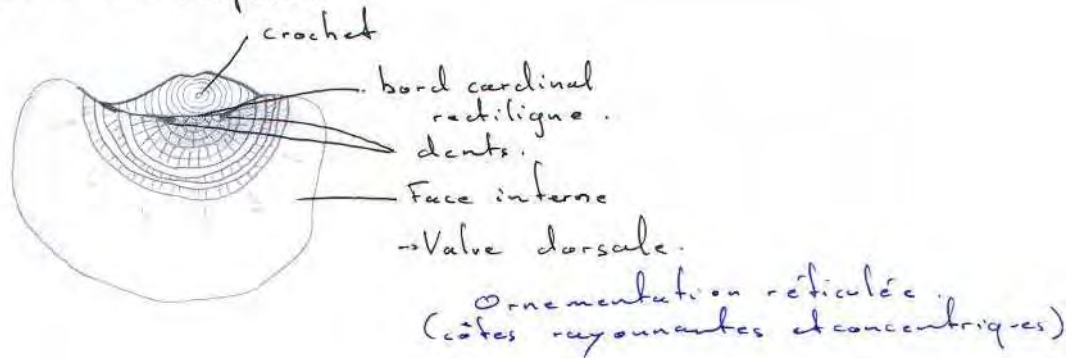
Formes des valves et squelette du lophophore : voir TP.

Le plan de symétrie est perpendiculaire au plan de commissure.

Règne : Animal

↳ Règne : Métazoaires

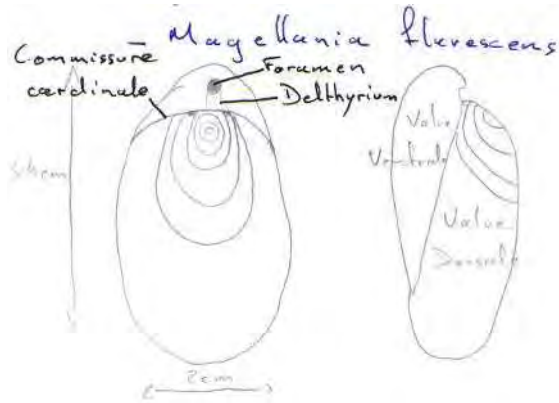
Ordre : Brachiopodes



B\ Vue interne : forme du brachidium.

La charnière est constituée de deux dents sur la valve ventrale qui s'insèrent dans les deux alvéoles (ou fossettes) de la valve dorsale. La coquille s'ouvre grâce aux muscles aducteurs et se ferme grâce aux muscles diducteurs.

On trouve un bourrelet sur la valve dorsale et un sinus sur la valve ventrale.



- Stries d'accroissement sur les deux valves
- Bombement important des valves.
- Coquille globuleuse.
- Cambrien moyen → Actuel.

C\ Milieu de vie.

Les brachiopodes sont marins, benthiques, épibiontes (rarement endobiontes). Ils occupent tous les habitats présents entre 0 et 200 mètres de profondeur. Actuellement, on trouve certaines formes présentes à -6500 mètres. Ils sont présents sous toutes les températures, sur des milieux sableux, caillouteux.

Leur vie larvaire est planctonique.

D\ Intérêt.

Les brachiopodes sont connus depuis le cambrien moyen. Ils ont un intérêt stratigraphique pour dater le paléozoïque et le jurassique.

Les mollusques.

I\ Caractéristiques générales des mollusques.

Parmi les mollusques, on trouve, les lamellibranches, les gastéropodes et les céphalopodes. Ces mollusques sont des organismes à corps mous, généralement protégés par une coquille calcaire.

Le mollusque primitif présente une symétrie bilatérale et est constitué de trois parties :

- La tête qui porte les yeux.
- Le pied qui est une masse musculaire ventrale a fonction locomotrice.
- La masse viscérale dorsale recouverte par le manteau qui entoure la cavité palléale et qui donne la coquille.

II\ Les lamellibranches.

A\ Morphologie.

Les lamellibranches ont un corps mou, présentent une symétrie bilatérale où l'on peut distinguer la droite et la gauche. Ils n'ont pas de tête différenciée ni d'yeux. Ils ont une bouche, un pied musculeux antéro-ventral et une coquille avec le manteau.

L'eau entre par la partie postérieure, fait le tour de l'organisme, passe par les branchies puis par la bouche et sort finalement par l'anus.

La coquille révèle des organes intérieurs. On trouve :

- L'empreinte palléale (du manteau) qui est continue de l'avant vers l'arrière : elle est intégripalliée. Si des siphons sont observables, la coquille est dite sinupalliée.
- Les empreintes musculaires. On en trouve de différents types. L'empreinte des muscles adducteurs (pour la fermeture de la coquille). En fait, on peut trouver un ou deux muscles adducteurs. S'il n'y a qu'un muscle, la coquille est dite monomyaire : le muscle est postérieur en position centrale. S'il y en a deux, on parle de coquille dimyaire. Si ces deux muscles sont égaux, la coquille est dimyaire isomyaire ; si les deux muscles sont différents, la coquille est dimyaire anisomyaire.

La partie dorsale porte la charnière. On trouve deux types de dents et de fossettes : dents et fossettes principales, sous le crochet ; dent et fossette latérales antérieures. Sur la charnière, on trouve une fossette ligamentaire.

B\ Caractéristiques externes.

Le crochet est dorsal et le bord ventral est son opposé. Généralement, le crochet est tourné vers l'avant (prosogyre). Les rares groupes d'individus ayant leur crochet tourné vers l'arrière sont appelés opistogyres.

On trouve des stries d'accroissement et d'ornementations concentriques en forme de cœur. La dépression située à l'arrière est appelée écusson ou corselet.

Si les valves sont égales, la coquille est équivalve. Si les valves sont différentes, la coquille est dite inéquivalve.

Quand le crochet est médian, la coquille est équilatérale. Quand le crochet est non médian, la coquille est inéquilatérale.

C\ Milieu de vie.

On trouve les lamellibranches dans tous les milieux aquatiques, même dans les sources chaudes.

Ils n'ont pas d'intérêt stratigraphique. Ils apparaissent à l'ordovicien. Ils peuvent servir d'indices écologiques sur la salinité.

III\ Les lamellibranches rudistes.

Les rudistes sont fixés et coloniaux.

Règne : Animal

Sous-Règne : Métazoaire

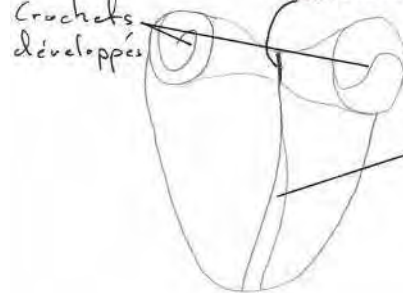
Embranchement : Mollusque

Ordre : Lamellibranches

→ Rudiste : enroulé en spire hélicoïdale.

Crochets développés

Commis sure des valves



Fossette ligamentaire.

- 2 valves enroulées semblables (= équivalves)
- Habitat fixé avec modification de la forme des valves.
- Jurassique supérieur (→ Crétacé)

A\ La coquille, structure interne.

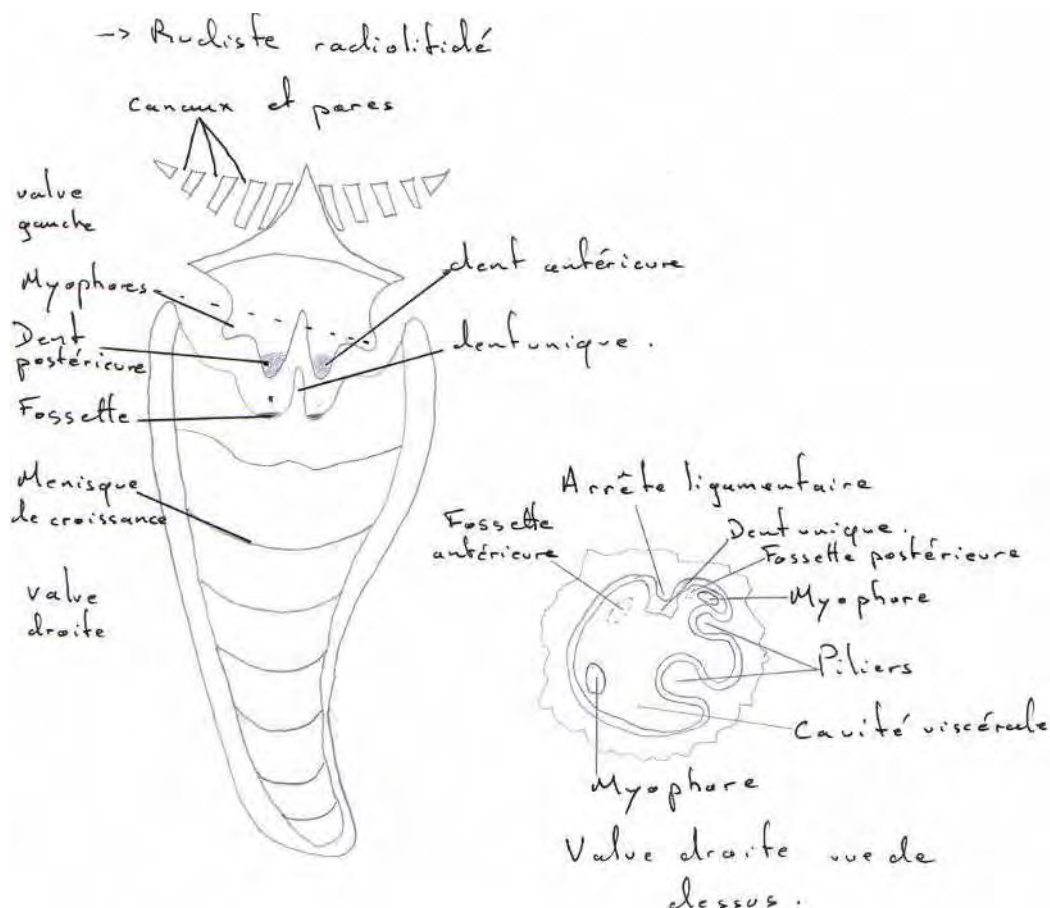
On trouve une charnière avec, sur la valve libre, deux dents et une fossette. La valve fixée présente une dent et deux fossettes.

Ligaments et muscles s'insèrent sur une fossette ou sur une arrête. Les muscles s'insèrent sur les lames myophores, bien développées.

Dans la valve droite, fixée, on trouve la cavité générale. L'oscul permet le passage de l'eau.

B\ Milieu de vie.

Les rudistes vivent sur une plate-forme carbonatée où ils se développent en colonies. Ils accompagnent les polypiers pour construire des récifs ou bien, ils le font eux-mêmes.



C\ Intérêt.

Les rudistes apparaissent au jurassique supérieur et disparaissent à la fin du crétacé. Ils ont aussi un intérêt géographique.

IV\ Les gastéropodes.

A\ Morphologie.

Les gastéropodes sont adaptés à la reptation.

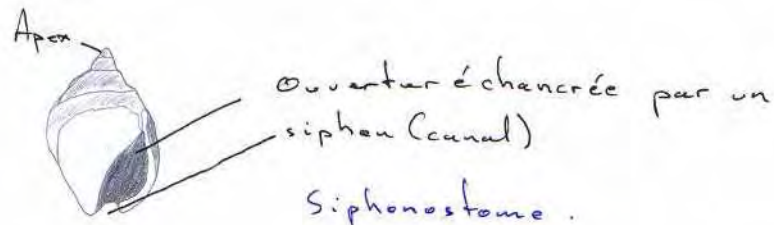
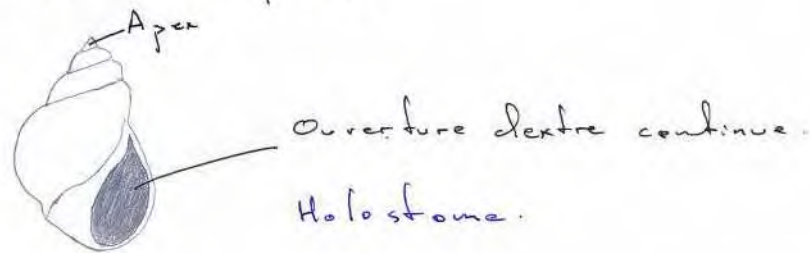
Leur coquille est univalve, enroulée.

La partie viscérale subit une torsion de 180° par rapport à la partie céphalopédieuse. Ce phénomène entraîne : - une position spéciale de la cavité palléale et de l'anus qui se retrouvent à l'avant - la disparition de la parité des organes.

La coquille n'est pas présente dans tous les groupes (limaces). Lorsque cette coquille est un tube enroulé, elle forme la columelle. Cette dernière peut être pleine ou creuse. Dans ce dernier cas, la columelle débouche à l'extérieur par un orifice, l'ombilic, qui peut être fermé par des plaques.

La coquille peut présenter une ornementation spirale ou une ornementation axiale (perpendiculaire à la spire). Ces deux types d'ornementation peuvent se recouper et former un réticulum (ornementation réticulée).

Ordre: Gastéropodes.



- coquille univalve
- dextre (mais peut être sénestre)
- cambrien inférieur (→ actuel)

B\ Mode et milieu de vie.

Les gastéropodes occupent les eaux douces, saumâtres, salées et même le milieu terrestre. En milieu marin, les gastéropodes sont du supralittoral au bassal. Ils peuvent être libres, fixés, benthiques, fouisseurs, planctoniques...

C\ Intérêt.

Les gastéropodes apparaissent au cambrien inférieur et peuvent parfois avoir un intérêt paléoécologique.

V\ Les céphalopodes.

Les céphalopodes ont un pied en position céphalique qui forme une couronne de tentacules et un entonnoir (hypostome).

Le système nerveux est condensé. Au niveau de la bouche, on trouve une radula et les formes prédatrices ont deux mâchoires cornées. Les yeux sont volumineux.

La coquille est univalve, externe chez le nautilé, intérieure chez la sèche et absente chez le poulpe et la pieuvre.

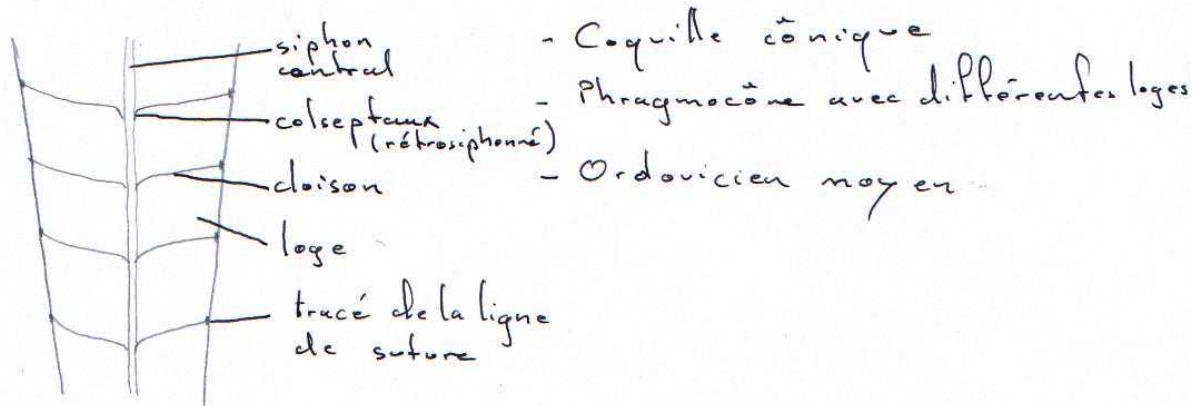
La cavité palléale sert à la respiration et à l'aspiration d'eau pour réaliser les mouvements (déplacement par réaction).

On trouve aussi une poche à encre.

Les embryons sont protégés par une enveloppe épaisse.

A\ Les nautiloïdés.

Orthoceras



1\ L'organe coquillier.

La coquille assure la flottabilité et la protection de l'animal. Elle est souvent colorée. Le capuchon protège les parties molles qui sont sorties. L'animal vit dans la dernière loge formée. Les vieilles loges sont remplies de gaz ou de liquide. L'individu est relié à la première loge formée par un siphon.

La coquille peut être conique ou enroulée.

Le phragmocône, souvent, correspond à la coquille cloisonnée. Les cloisons sont concaves vers l'avant : cloisons procœles. Les cloisons, en s'insérant sur l'extérieur de la coquille, vont former une ligne de suture.

Le siphon est prolongé par des pièces calcaires : goulot (ou col) siphonal (ou septal).

Les nautilés peuvent mesurer de quelques centimètres à 10 mètres.

2\ Mode de vie.

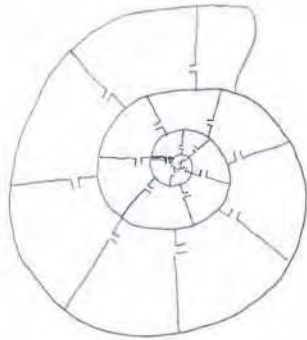
Les nautilés sont généralement microphages. Les formes actuelles vivent pendant le jour entre 600 et 800 mètres de profondeur. Pendant la nuit, ils remontent entre 7 et 10 mètres. Ils sont benthiques et lents.

3\ Intérêt.

Les nautilés apparaissent au cambrien supérieur. Leur nombre diminue fortement au crétacé. Certaines formes du paléozoïque sont stratigraphiques.

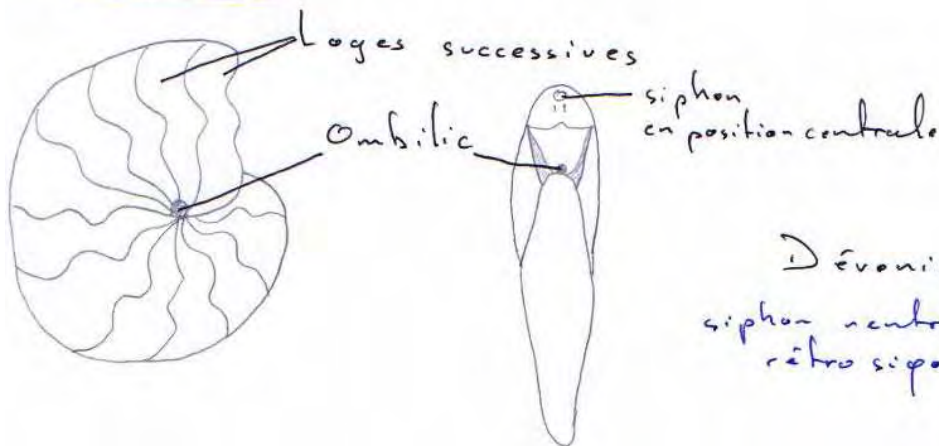
B\ Les ammonoïdés.

Clymenie.



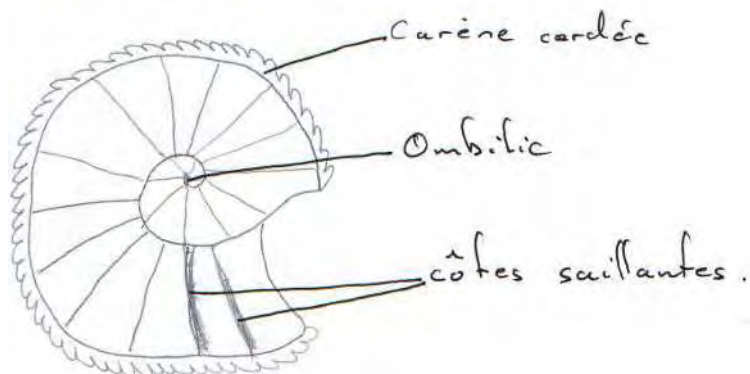
- Siphon dorsal, rétro-siphonné
- Enroulement spiral
- Loges successives
- ⇒ seule ammonite à être rétro-siphonnée.
- Dévonien supérieur.

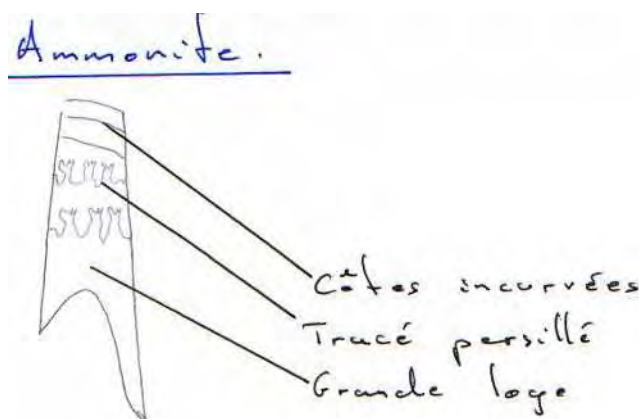
- Goniatite.



Dévonien → Permien (fin)
siphon ventral en position rétro-siphonnée.

Ammonite.





1\ Généralités.

α \ Caractères extérieurs.

La coquille a une épaisseur variable. Elle est fonction du milieu de vie. Sa taille peut aller de quelques millimètres à 2,5 mètres.

Cette coquille d'ammonoidés peut présenter différents enroulements.

- Quand on voit tous les tours à l'extérieur, coquille évolutive, les tours ont un ombilic large et une tendance à devenir carré.
- Quand il n'apparaît que le dernier tour, on parle de coquille involutive. La coquille aura une section ogivale. L'ombilic est constitué d'un point : punkiforme.
- Les formes présentant des déroulements partiels ou totaux sont des formes adaptées à des milieux de vie particuliers.

L'ornementation composée de nombreuses formes peut être transverse ou longitudinale.

L'ouverture est simple, partiellement fermée (protection) ou prolongée d'ornementation. La coquille est fermée par des opercules, les aptychus, pairs. Ces aptychus pourraient être des mâchoires internes d'ammonoidés.

β \ Caractères internes.

Le siphon, comme chez les nautiloïdés, existe mais il est soit ventral (externe → coquille extra-siphonnée), soit dorsal (interne → coquille intra-siphonnée). Si les cols septaux sont tournés vers la première loge, la coquille est rétrosiphonnée. Si ces cols sont tournés vers l'avant, la coquille est prosiphonnée.

γ \ La ligne de suture.

Chez les ammonoidés, les cloisons sont complexes, avec de nombreux replis pour augmenter la solidité. Cette ligne de suture va présenter des ondulations avec deux types de replis :

- Les replis tournés vers l'avant sont les selles (simples ou subdivisées).
- Les replis tournés vers l'arrière sont les lobes (simples ou subdivisés).

La ligne de suture est dite persillée quand elle est très complexe.

- Quand la ligne de suture est simple, on dit qu'elle est au « stade goniatite ».
- Quand la ligne de suture a ses lobes subdivisés, on dit qu'elle est au « stade cératite ».
- Quand la ligne de suture a ses lobes et ses selles subdivisées, on dit qu'elle est au « stade ammonite ».

Nautiloïdæ --> Rétrosiphonné		Siphon central	Lobes et selles simples	
	Rétrosiphonnés	Intrasiphonnés	Lobes et selles	L et S simples, clinémie
		Extrasiphonnés	Lobes et selles	L et S simples, goniatite
Ammonoïdea				
		Extrasiphonnés	Lobes et selles	L divisés et S simples, cératite
	Prosiphonnés	Extrasiphonnés	Lobes et selles	L divisés et S persillées, ammonite

2\ Mode et milieu de vie.

Les ammonoïdés sont marins, bons nageurs. Ils peuvent être benthiques, pélagiques, fixés (posés) ou libres. On les trouve dans tous les étages sauf dans le supra et médiolittoral.

3\ Intérêt.

Les ammonoïdés apparaissent au dévonien supérieur et disparaissent à la fin du crétacé. Beaucoup du paléozoïque et tout le mésozoïque sont fondés sur la présence des ammonoïdés.

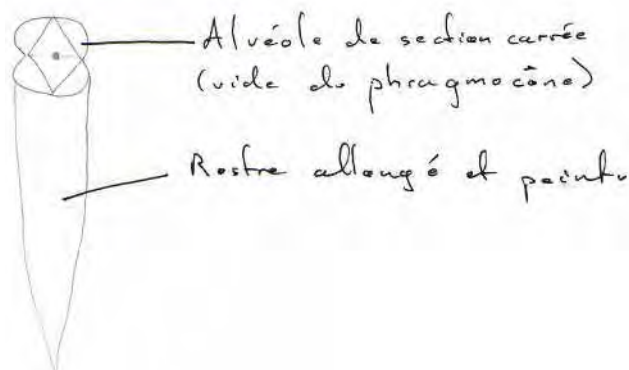
VI\ La sous-classe des coléoilidea.

A\ Morphologie de la coquille.

Les coléoilidea sont des céphalopodes dibranchiaux. Cette sous-classe regroupe tous les céphalopodes actuels excepté les nautes. Leur coquille est interne mais disparaît dans certains groupes.

B\ Les Bélemnites.

- Bélemnites.

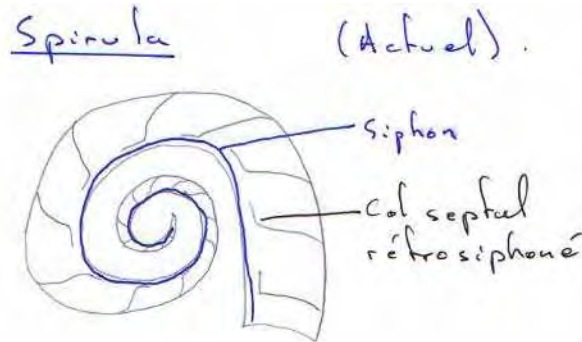


Les bélemnites ont une coquille en trois parties. Ils n'ont pas de loge d'habitation. Le rostre est allongé, lisse ou avec des sillons longitudinaux (pour l'insertion de nageoires). Ce rostre est à l'extrémité postérieure de la coquille de l'individu. Il sert de lest. Il entoure aussi le phragmocône et le protège.

Le phragmocône est une partie fragile, divisée en une loge généralement percée d'un siphon.

Le proostracum est une extension dorsale du phragmocône, rarement conservée par la fossilisation. Il est en position dorsale (comme l'entonnoir).

C\ Les spirulidés.



Les spirulidés ont une coquille qui s'enroule en spirale lâche. Il n'y a que le phragmocône divisé en loges percées d'un siphon.

→ Les coléoilidea peuvent :

- Vivre en groupe.
 - Être carnivore.
 - Être pélagique.
 - Se laisser porter par le courant.
- Ils ne sont pas inféodés au fond.
- Ils n'ont aucun intérêt.

Les arthropodes.

I\ Morphologie générale.

Les arthropodes constituent 80% des espèces actuelles. Leur corps est divisé en segments (somites), recouvert et protégé par une cuticule chitineuse rigide (non minéralisée) : c'est un exosquelette. Cet exosquelette sert de point d'appui pour les muscles moteurs.

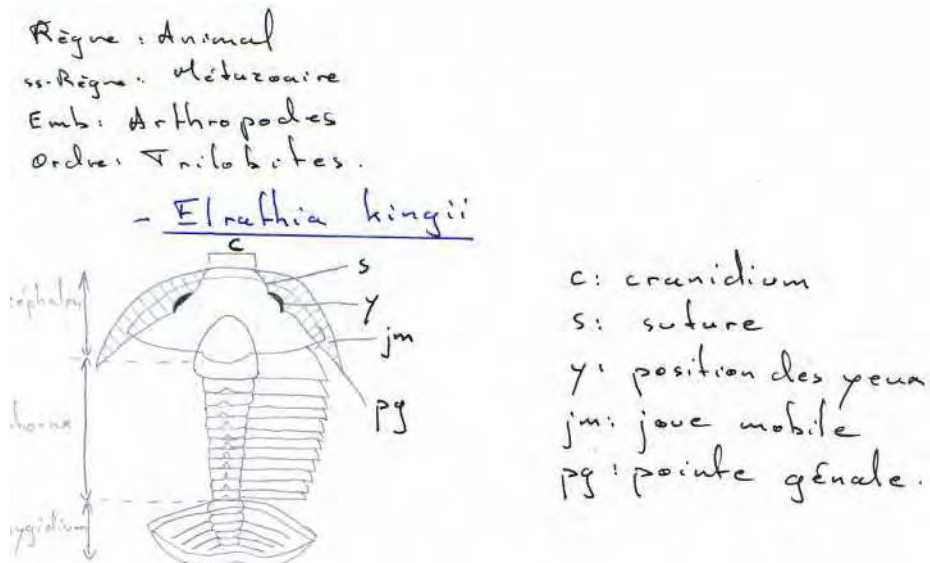
La croissance des arthropodes est discontinue, réalisée par mue(s).

Nombres de segments ont tendance à fusionner. En général, on peut distinguer trois parties :

- Chez les trilobites, ce sont : le céphalon, le thorax, le pygidium.
- Chez les insectes, ce sont : la tête, le thorax, l'abdomen.
- Chez les crustacés, on ne distinguera que deux parties : le céphalothorax et l'abdomen.

Chaque somite porte une paire d'appendices. Ces appendices peuvent être uniramés ou biramés. Les trilobites ont des appendices biramés et l'on y trouve une rame locomotrice et une rame respiratoire.

II\ Les trilobites.



A\ morphologie extérieure.

Les trilobites sont tous des arthropodes fossiles, marins. Leur taille est comprise entre 2mm et 10cm en moyenne. Certains cas arrivent à 75cm.

Les segments présentent une trilobation dans les deux sens. Le corps présente sa face dorsale qui est bombée et sa face ventrale, plate.

1\ La face dorsale.

La face dorsale est donc bombée, recouverte d'un tégument dur, légèrement replié sur la face ventrale.

α\ Le céphalon.

Le céphalon correspond à la partie antérieure hémicirculaire. On y trouve un lobe médian enflé : la glabelle. De part et d'autre du céphalon se trouvent les joues.

Les joues sont constituées, chacune, de 5 à 7 segments soudés dont la forme est variable.

La glabelle porte des sillons qui délimitent les segments originaux.

Le segment occipital est bien individualisé.

Les joues sont limitées latéralement par le bourrelet céphalique. Celles-ci sont fixées à la glabelle et sont donc fixes. Entre ces deux dernières, on trouve les joues extérieures qui sont mobiles.

La suture faciale est au niveau de la ligne de mue (qui permet les mues).

L'œil, au bout de la crête oculaire, traverse toute la joue fixe. La crête est rattachée à la glabelle. On peut trouver jusqu'à 300 lentilles cornéennes. Il existe aussi des formes aveugles. La ligne va permettre la classification.

β\ Le thorax.

Le thorax est composé de 2 à 44 segments. On trouve un anneau axial et les plèvres latérales. Les anneaux diminuent en largeur en se dirigeant vers l'extrémité postérieure. Ces anneaux peuvent porter des pointes pleurales.

γ\ Le pygidium.

Le pygidium, constitué d'au maximum 30 segments soudés forme un bouclier rigide. Généralement, les segments sont visibles. Ce pygidium peut avoir des formes variables, peut être orné et porter une pointe caudale pour la défense.

Les trilobites peuvent s'enrouler : c'est la volvation.

2\ La face ventrale.

La face ventrale est recouverte d'une mince cuticule et porte les appendices. La bouche s'ouvre entre deux plaques. La paire d'antenne et l'appendice céphalique sont mal connus. Les appendices thoraciques sont biramés. Les rames sont fixées sur le sympodite (premier article). On y trouve :

- Une rame locomotrice (pour la nage ou fouiller la vase). Les limivores ingèrent la vase et captent les molécules organiques.
- L'exopodite (deuxième article) porte les lamelles branchiales qui ont un rôle respiratoire mais aussi de capture des proies.
- Le pygidium porte l'anus.

B\ Morphologie interne.

La bouche, ventrale, est poursuivie par l'œsophage et l'estomac (dans la glabelle). Les joues contiennent des cœcums géniaux (≈ hépato-pancréas). Le tube digestif passe dans le rachis médian. Le dernier segment comprend l'anus.

C\ Mode et milieu de vie.

Les trilobites sont marins, benthiques, marchent ou nagent au fond. Ils sont épidiontes ou fouisseurs, microphages ou nécrophages. Quelques rares formes sont pélagiques en dans ce cas, on les trouve en milieu médio ou cercalittoral.

Ils apparaissent au cambrien inférieur et sont témoins de la création de biozones.

Les échinodermes.

I\ Organisation générale.

Les échinodermes présentent une symétrie pentaradiée chez l'adulte. La symétrie bilatérale est acquise ultérieurement. Ils ont un exosquelette formé de plaques juxtaposées avec des radioles (piquants) articulées.

Leur système aquifère est composé d'un hydrocœle qui communique avec l'extérieur par un orifice (unique ou multiple) : la plaque madréporique.

II\ Le groupe des crinoidea (fixés).



A\ Morphologie.

Le squelette des crinoidea montre une symétrie pentaradiée et est composé de trois parties :

- La couronne est composée du calice et du tegmen. Le calice porte les bras et est fixé par la tige. La partie sous les plaques brachiales est la coupe ou capsule dorsale. Elle est globuleuse, conique, évasée ; elle contient les parties molles de l'individu. La coupe s'ordonne en un cycle. La partie supérieure, tegmen, est constituée d'une plaque percée par la bouche, entourée de 5 plaques orales. L'anus perce en latéral.
- Les bras sont constitués d'articles (plaques brachiales) qui sont mobiles et reliés entre eux par des muscles et des ligaments. Le bras est percé en son centre par un canal nerveux. Au-dessus sont insérés les pinnules qui servent à la capture des proies.
- La tige soit n'existe pas, soit existe et peut atteindre 20 mètres de long. Elle est composée d'articles (columnale) qui s'empilent et sont réunis par du tissu conjonctif. Au centre, on trouve un canal axial. La tige peut être circulaire, étoilée...

B\ Mode et milieu de vie.

On trouve ces crinoidea sur l'étagé circalittoral et bassal (maintenant, dans l'infralittoral intérieur). Les articles tombent et donnent des calcaires à entroques.

Ce sont des microphages suspensivores.

C\ Intérêt.

Les crinoidea apparaissent à l'ordovicien et durent jusqu'à l'actuel. Ce sont des marqueurs paléoécologiques de faciès relativement profonds.

III\ Les échinidea.

R: Animal

s-R: Métazoaire.

Emb: Echinodermata

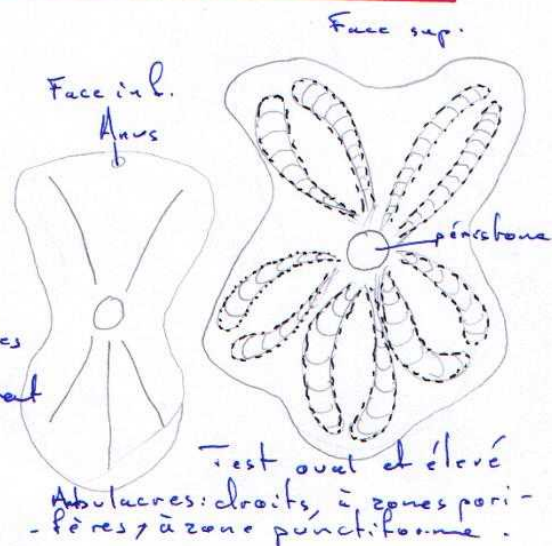
s-Emb: Echinozoa.

Classe: Echinoidea. (oursin irrégulier).

- Echinocarys.

- Plaq. interambulacraires st 2x + hautes que les plaques ambulacraires.
- Apex tétrabasal allongé; plaq. génitales alternent avec plaques ocellaires.
- Plastron en arrière du péristome

Crétacé sup.



A\ Morphologie des oursins réguliers.

Echinoderme libre. Corps recouvert d'une thèque constituée de plaques. La face orale est la face tournée vers le sol ; la bouche s'ouvre au centre d'une membrane : le péristome.

La face anale est la partie supérieure dont l'anus s'ouvre sur le périprocte. Cet anus est entouré d'un système de deux fois cinq plaques.

1\ L'appareil apical.

Cet appareil est régulier lorsqu'il y a symétrie pentaradiée. Il est irrégulier quand l'anus et la bouche ne sont pas dans le même plan.

L'appareil apical est composé de : l'anus, le périprocte et les deux fois cinq plaques.

Autour du périprocte, on a 10 plaques calcaires. Cf. schéma.

Autour de l'anus, les plaques génitales sont percées d'un pore génital. Une de ces plaques se distingue des autres : c'est la plaque madréporique (elle sert à orienter l'animal).

On trouve cinq autres plaques plus petites, percées d'un pore plus petit : ce sont les plaques ocellaires.

On a ensuite deux cas :

- Oursin bicycle.
- Oursin monocyclique : alternance de plaques génitales et ocellaires.

Chez les réguliers, l'anus est endocyte. Les plaques ocellaires sont au bout des plaques ambulacraires.

Pré ambulacraire → génital.

2\ La couronne.

La couronne se poursuit jusqu'au périprocte. Elle est constituée de plaques coronales organisées en colonnes. Il y a vingt colonnes réparties en dix zones : cinq zones ambulacraires et cinq interambulacraires.

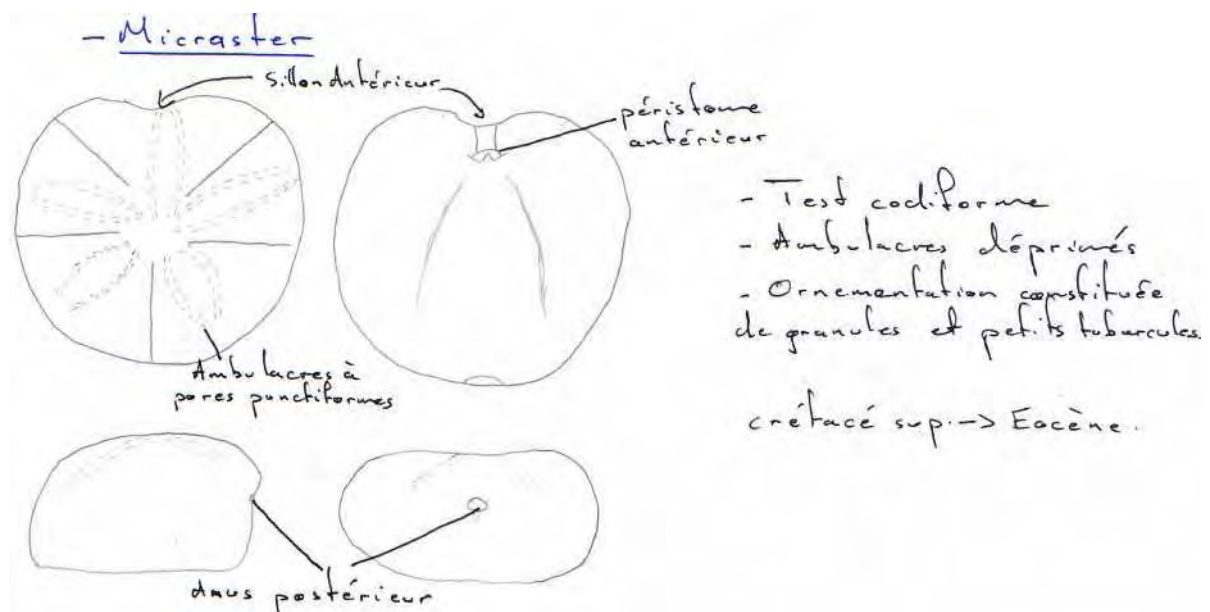
Dans les zones ambulacraires, les plaques sont petites et percées d'un ou plusieurs pores pour les podia de l'oursin.

Dans la zone interambulacraire, les plaques sont généralement plus grandes, larges, hautes et ne sont pas percées. Elles portent des granules pour l'insertion de radioles.

3\ Le périostome (face inférieure).

C'est une membrane avec de petites plaques percées d'un orifice avec cinq dents réunies dans la lanterne d'Aristote.

B\ Morphologie des oursins irréguliers.



Ils ont une symétrie bilatérale qui se superpose à la symétrie pentaradiée. La bouche (à l'avant) est opposée à l'anus (à l'arrière).

L'anus va se déplacer et quitter l'appareil apical. L'oursin est dit exocyte. La plaque 5 peut sauter et on aura 4 plaques génitales 5 ocellaires. L'appareil apical est tétrabasal.

Une modification dans les plaques madréporiques peut se développer et prendre la place de toutes les plaques génitales : l'appareil apical est monobasal.

Lorsque l'anus a quitté l'appareil apical → réajustement : cf. TP. Le plastron perd une ornementation différente. L'anus peut venir près de la face orale → ouverture.

La bouche ne peut se déplacer que vers l'avant → modifications dans l'ordre ou la quantité des dents.

- Collyrites



- Test elliptique
- Ambulacres:
 - antérieurs → trivium
 - postérieurs → bivium.
- Pores punch. formes
- Apex dissocié
- Anus postérieur
- Péristome arrondi antérieur
- Ornementation en fins granules.

Jurassique sup. → Crétacé inf.
(Néocomien)

C\ Mode et milieu de vie.

Animaux marins benthiques sténohalins (sténo = ils ne s'adaptent pas aux variations).

Inter littoral : tous les étages.

Il existe des formes enfouies.

D\ Intérêt.

Cambrien supérieur et échinidé → Ordovicien.

Echinizoa.

Paléoécologique.

Les végétaux.

I\ Généralités.

A\ Classification simplifiée.

Cf. planche 1.

Ils sont moins bien conservés que les animaux car le milieu continental est moins favorable aux fossiles. Les tiges et les feuilles qui contiennent de la lignine se fossilisent mieux (par rapport aux fruits).

On a : soit une empreinte par enfouissement, soit une minéralisation des cellules, soit une incrustation de carbonate de calcium.

Sept stades ont été distingués et trois niveaux d'organisation.

B\ Le premier niveau d'organisation.

Ce sont les êtres unicellulaires procaryotes comme les cyanophycées.

C\ Le second niveau d'organisation.

On a une cellule ou un amas ; ces cellules sont eucaryotes et ne montrent pas de différenciation, on a une tige, des racines, des feuilles (comme les thallophytes).

D\ Le troisième niveau d'organisation.

Ceux sont les végétaux pluricellulaires dont les cellules sont réunies sous forme de tissus qu'on appelle parenchyme.

Les gamètes femelles sont les oosphères et s'individualisent dans l'archégone.

Le gamète mâle vient ensuite à la rencontre de l'oosphère.

Sous le règne des archégoniates, on trouve : les bryophytes, les ptéridophytes et les spermatophytes.

Les bryophytes ont une tige mais on ne trouve ni racine ni vaisseaux conducteurs.

Les ptéridophytes : ils ont une tige, des racines, des feuilles mais on trouve ni de fleur ni de graine et la reproduction est possible grâce à des spores.

Les spermatophytes : ils comprennent une tige, des racines, des feuilles, des graines, des fleurs et des vaisseaux conducteurs. Dans ce groupe, on trouve les gymnospermes où la graine est nue. On a aussi les angiospermes qui ont leurs graines dans les carpelles (mono et dicotylédones).

II\ Quelques Végétaux.

A\ Les bactéries.

On trouve ici les protistes et les unicellulaires.

Exemple : microcodium. On le trouve sous forme de prisme de calcite disposé en fibres de maïs autour d'un point central. Il y a précipitation de CaCO_3 autour de bactéries filamenteuses. Ils sont lacustres ou très fortement dessalés. On les trouve au crétacé supérieur.

B\ Cyanophycées : stromatolithes.

Elles ont une structure rubanée ou en concrétion (colonnes) de quelques millimètres à plusieurs mètres de haut.

L'action des cyanophycées est retrouvée dans la lamination.

C\ Embranchement des chromophytes.

1\ La classe des diatomées.

Les diatomées sont des algues unicellulaires autotrophes, marines ou lacustres qui sont enfouies dans une coque siliceuse : un frustule qui est constitué de deux valves emboîtées.

Elles font de 0,02mm à 0,3mm. Elles sont benthiques planctoniques et forment le premier maillon de la chaîne alimentaire.

2\ La classe des coccolithophoridés.

Ce sont des algues unicellulaires. La cellule est globuleuse et entourée par une enveloppe sphérique : la coccosphère qui est constituée par un assemblage de plaques calcaires qu'on appelle les coccolithes (entre 10 et 30).

A leur mort, les coccolithes sont dissociées et forment une roche calcaire par accumulation : c'est la craie.

Ils sont marins planctoniques, appartiennent au crétacé supérieur, vivent dans les eaux chaudes, tempérées mais avec une salinité normale. On a deux types de coccolithes.

D\ L'embranchement des chlorophytes.

1\ La classe des chlorophycées.

C'est un thalle cylindrique ramifié, articulé et protégé, en général, par un manchon calcaire. Ce thalle porte des rameaux simples ou ramifiés qui sont verticillés.

Ces rameaux traversent le manchon calcaire. Ce sont des algues marines et saumâtres.

α\ La famille des Udoteaceae.

Le thalle est en forme de tube ou de filaments siphonnés. Ils se divisent généralement par dichotomie.

Leur vie est marine d'interne à externe.

On trouvera des fragments de thalles.

β\ La famille des Caulerpaceae.

Cf. planche.

2\ La classe des chlorophycées.

Cf. cas de Monaco avec son aquarium.

L'appareil digitatif est composé de tige et de rameaux articulés. Sur la tige, il y a alternance d'articles longs (inter nœuds) et d'articles très courts (nœuds). Ces nœuds émettent des feuillettes et des organes reproducteurs : anthéridies / oogones. L'organe qui va se fossiliser est l'oogone (ou gyrogonite). On a cinq lames spirales qui sont différemment ornementées.

Ce sont des végétaux d'eau douce et peu salée : ce sont des fossiles importants pour la datation.

E\ L'embranchement des Ptéridophytes.

1\ L'ordre des lépidodendrales.

α\ Le genre Lepidodendron.

Ce sont des végétaux arborescents de 10 à 20 mètres de haut. Le tronc est écaillé ; l'appareil végétatif est divisé dichotomiquement. Les épis sporifères sont les lépidostrobus.

β\ Le genre Sigillaria.

Les épis sont sporifères : sigilariostrobus.

Cicatrices foliaires qui ont une forme de saut.

2\ L'ordre des Sphénophyllales.

Le genre sphenophyllum : les rameaux constituent les verticilles des feuilles.

3\ L'ordre des Equisétales.

Genre Calamite : le tronc est articulé comme les branches et les rameaux.

Cf. figure 17 → Calamites.

Les rameaux portent des verticilles de feuilles : Anularia (cf. schéma 18). On montre généralement le moule interne du tronc.

4\ La classe des filicopsidées (primofilicinées).

Cf. schéma 20. Ce sont des restes de fougères, classées suivant la forme et la nervation des folioles.

F\ Embranchement des spermaphytes.

1\ Le sous embranchement des Gymnospermes.

α \ Ordre des Bennetitales.

Genre Ptérophylum : cf. schéma 22. Ce sont des frondes sous forme de longues languettes et qui sont rattachées au rameau par la totalité de la base.

β \ Ordre des Cordaïtales.

Cf. schéma 23 : L'arbre est haut (30 ou 40m) et ses branches sont terminées par des bouquets de grandes feuilles lancéolées.

γ \ Ordre des Coniférales.

Cf. schéma 24.

On a deux genres importants :

- Lewachia : les rameaux portent de petites feuilles en faucilles et passent graduellement à des écailles ovulifères.
- Wachia : restes infertiles.

2\ Sous embranchement des angiospermes.

α \ Classe des dicotylédones.

Genre Juglen.

β \ Classe des monocotylédones.

Genre Néricum : laurier rose.

Feuillet long pétale court.