



BioGeoPal - L3

Objectifs et méthodes de la paléontologie

K. Benzerara - C. Langlois

A.L. Auzende, M.B. Forel

20 novembre 2006

BioGeoPal - Cours n°1



Fossiles et paléontologie

- **Etymologie**

- *palaios* : ancien
- *ontos* : être
- *logos* : étude

- Paléontologie : mot créé en 1825

1. **Qu'est-ce qu'un fossile ?**

- « fossilis »: tiré de la terre
- Reste, empreinte ou moulage naturel d'organisme conservé dans les archives géologiques.
- Par extension, toute trace d'une vie passée conservée dans les archives géologiques.

2. **Que retrouve-t-on ?**

On retrouve les parties dures (squelettes, coquilles...)...



...mais parfois aussi les empreintes des parties molles



Dickinsonia, Ediacara (Australie), ~570 Ma. Taxinomie: ?

Jurassique supérieur (~155 Ma)
Classe des oiseaux

Parfois, l'état de conservation est exceptionnel...

... et donne accès aux composants biochimiques des organismes (protéines, ADN...)

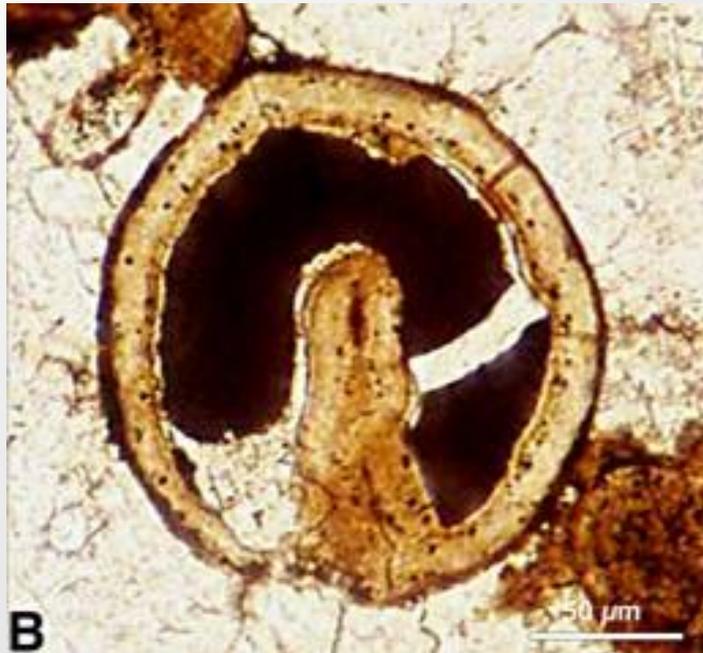


Exemples : insecte pris dans de l'ambre, mer Baltique, ~ 40 Ma

Différents stades du cycle de développement peuvent être conservés



Embryons minéralisés en phosphates, **570 à 599 Ma**

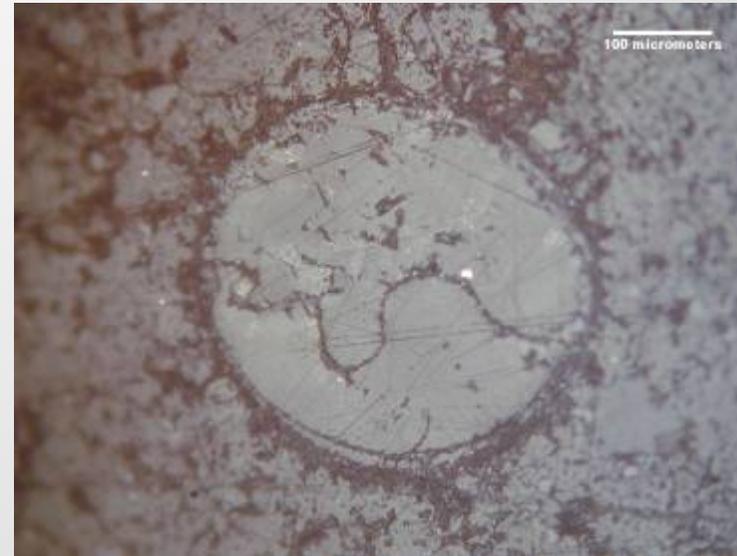


Animaux comme végétaux... peuvent être fossilisés

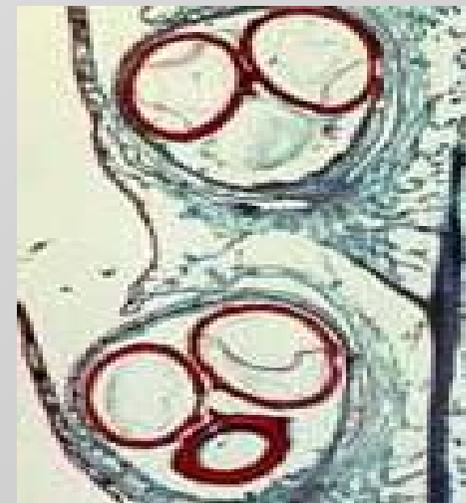


Tronc de Calamites
(« Prêle
arborescente »),
Ptéridophyte
Carbonifère, ~305 Ma

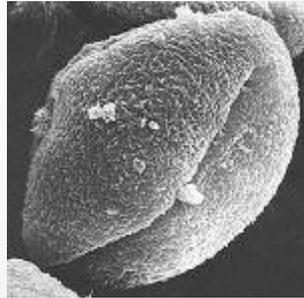
Mégaspore de lycophyte, Trias ~220 Ma



Mégaspore actuelle
de Sélaginelle



Champignons, unicellulaires, bactéries... également



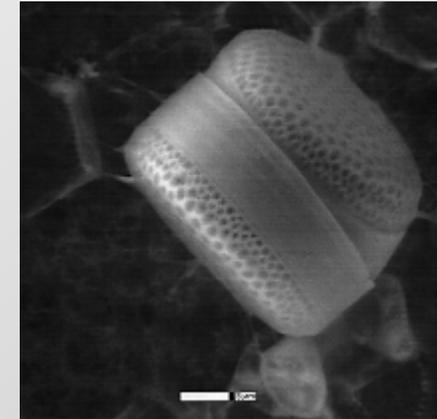
Préservation abondante de spores et de grains de pollen...

Pollen de Fagacée. Oligocène



Diatomées, algue unicellulaire siliceuse. Crétacé - actuel

(barre blanche = 5mm)



Nummulites, Foraminifère benthique. Paléogène (65-23 Ma)



Stromatolite



Constructions bactériennes fossilisées. **Stromatolites**, Australie, ~2,7 Ga.

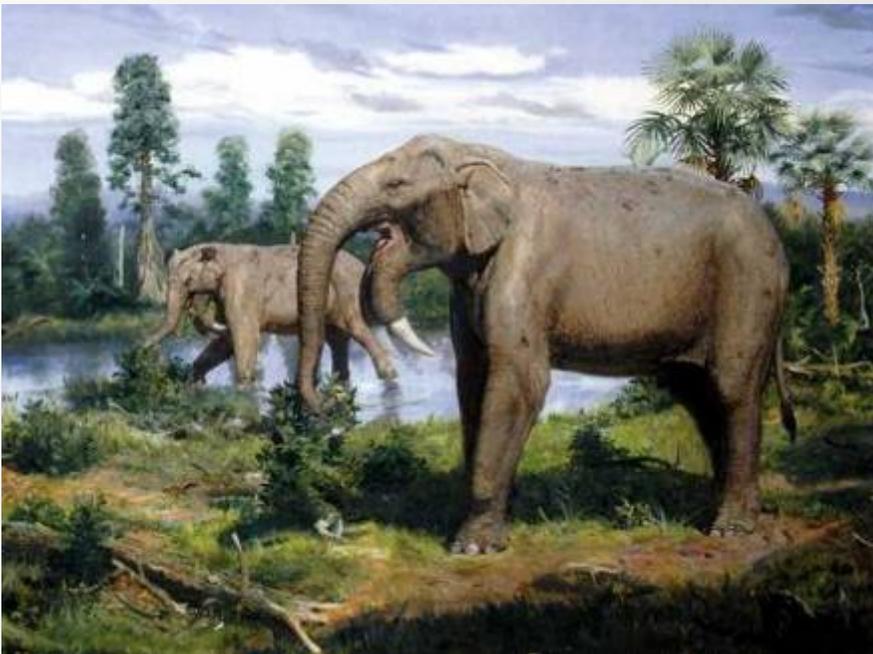
Un fossile peut n'être qu'une portion d'organisme...



Dent de Dinothère,
Miocène, ~17 Ma



Rostre de Bélemnite, Crétacé

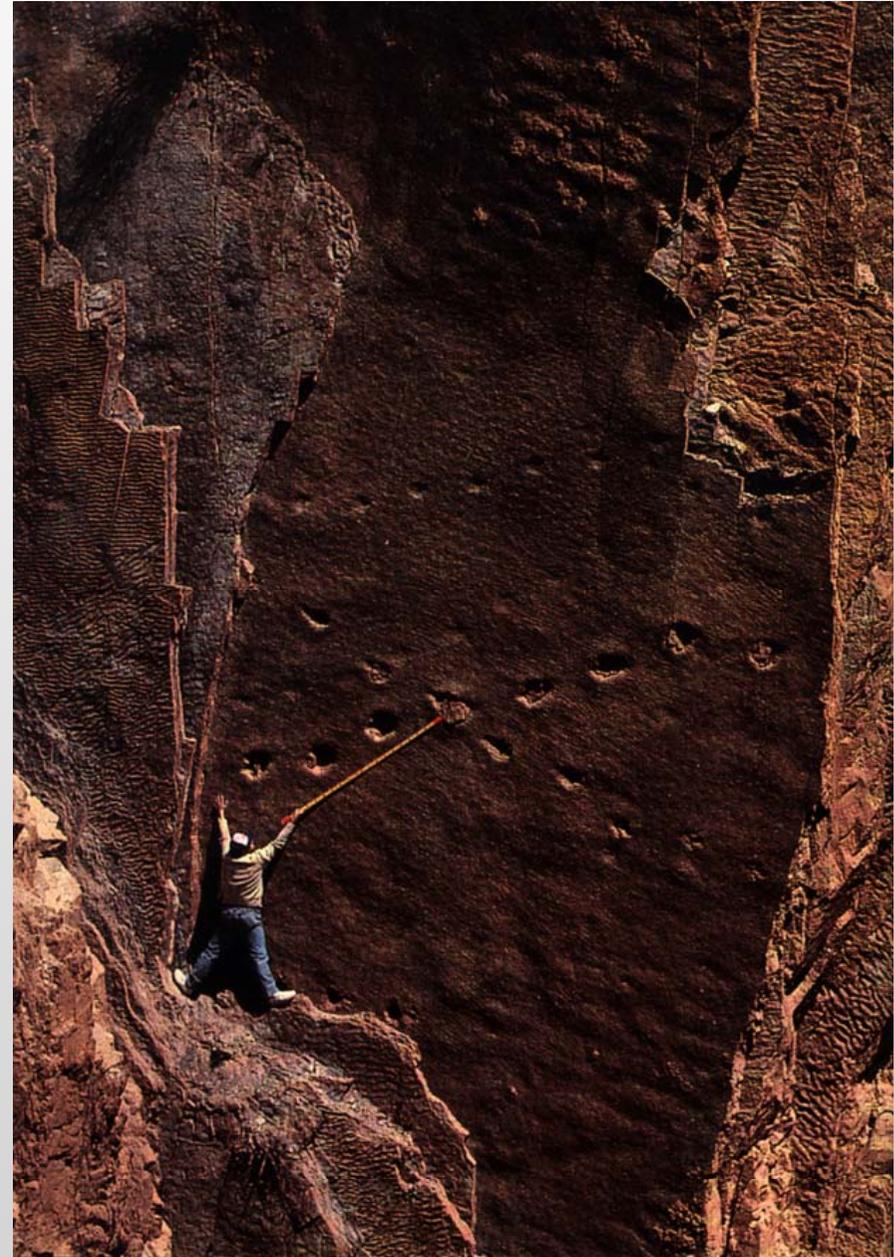


...ou simplement une trace d'activité biologique



Pistes d'Arthropodes...

... ou de grands
vertébrés



UP THE WALL. Spread-eagled against an almost vertical rock face, Argentine

Fossiles chimiques

1. Préservation de **molécules biochimiques** dans le sédiment ou associé à l'organisme.
 - **Sporopollénine, chitine** pour les plus résistantes
 - Dérivés de cuticule, cellulose etc...
 - **Kérogènes** résultant de la diagenèse (action des microorganismes, de T et de P) d'un matériau carboné. Certaines molécules relativement complexes conservent une structure chimique qui permet, connaissant les processus généraux qui les affectent au cours de la diagenèse, de remonter aux molécules initiales, et par conséquent aux organismes qui les ont synthétisés (en tant que grandes catégories (plantes, bactéries, archées, animaux...)). Ces molécules fossiles sont appelées des **biomarqueurs**.
 - Exceptionnellement protéines, acides nucléiques (ambre, mammoth congelés, dents)
2. Préservation, dans le sédiment, de **rappports isotopiques** particuliers de certains éléments pouvant être liés à une paléo-activité biologique.
 - $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ chez les organismes photosynthétiques
 - $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ chez les bactéries sulfato-réductrices

Des minéralogies variées

1. Tissus minéralisés *in vivo* :

- Variété morphologique :
 - squelettes,
 - coquilles, tests, cuticules
 - portions d'organismes (dents, otolithes de poissons, spicules d'oursin...)
- Variété microstructurale :
 - Echinodermes : tests en grille tridimensionnelle, avec relativement peu de CaCO₃
 - Mollusques : coquille avec plusieurs tissus superposés de structures et de chimie différentes (aragonite - calcite)...



Otolithe de poisson vu au microscope électronique à balayage



Émail de rat vu au microscope électronique à balayage



Épine d'oursin vue au microscope électronique à balayage



Coccolithes d'*Emiliana huxleyi* (actuel), vue au MEB

Des compositions chimiques variées

1. CaCO_3 :

- *Aragonite* : Sclérouctinaires, de nombreux Mollusques, les otolithes des Poissons, Diverses algues (Dasycladales...)
- *Calcite(s)* :
 - *pure* : Ostracodes, Brachiopodes, Bryozoaires, Coccolithophoridés, beaucoup de Foraminifères, Charophytes...
 - *magnésienne* : spicules d'éponges calcaires, Échinodermes, Corallinacées, certains Foraminifères (les Nummulites, en particulier)... : cette calcite magnésienne évolue en perdant son magnésium, remplacé par du calcium, sans altération de la microstructure, lors de la diagenèse.

2. Opale (silice SiO_2) :

- Diatomées
- Radiolaires

3. Phosphates (hydroxyfluoroapatite) :

- Squelettes et dents des Vertébrés
- Conodontes

4. Carbone organique :

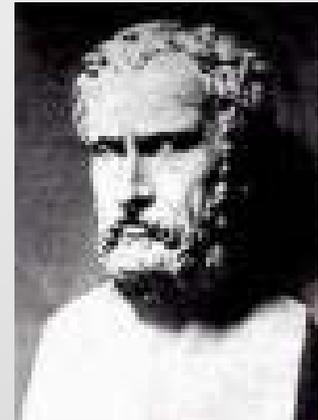
- Chitine : graptolites
- Sporopollenine : spores végétales, pollens, kystes de Dinoflagellés
- Bois et cutines végétales

Comment interpréter les fossiles ?

- Certains ressemblent à des êtres vivants actuels
Ex: stromatolites, insectes dans l'ambre
- Beaucoup en revanche n'ont pas d'équivalents aujourd'hui...
- ...Même s'ils peuvent présenter des ressemblances avec des êtres vivants actuels
Ex: Dinothère/elephant, rostre de Bélemnite/rostre de seiche...
- Mais ces ressemblances n'ont pas toujours été interprétés comme telles.
- Et , par ailleurs, on ne sait pas du tout classer certains fossiles: *Incertae sedis*

Historique (1)

- Les fossiles n'ont pas toujours été reconnus comme étant des restes d'animaux ayant vécu dans un passé lointain. On pensait autrefois qu'ils étaient d'étranges **formations minérales...**
- **Xénophane** reconnut dès le 6ème siècle avant JC des coquilles marines fossiles dans les collines de Paros (une île en Ionie) et en conclut qu'elles avaient été submergées dans un passé lointain.
- **Léonardo da Vinci** (1452-1519) réalisa aussi que les fossiles sont d'anciens restes d'êtres vivants et réfuta la théorie selon laquelle le déluge expliquait la présence de fossiles d'organismes marins dans des collines et des montagnes.
- **Agricola** (1546) : crée le mot « fossile »



Xénophane



Leonardo da Vinci

Historique (2)

- Cette interprétation fut réitérée par **Frascati** (1517) et **Bernard Palissy** (1575), mais cette théorie ne fut pas acceptée avant le milieu du dix-huitième siècle.
- On considère souvent **Georges Cuvier** (1769-1832) comme le fondateur de la paléontologie car il fut le premier à y consacrer une majeure partie de sa carrière...

Bernard Palissy



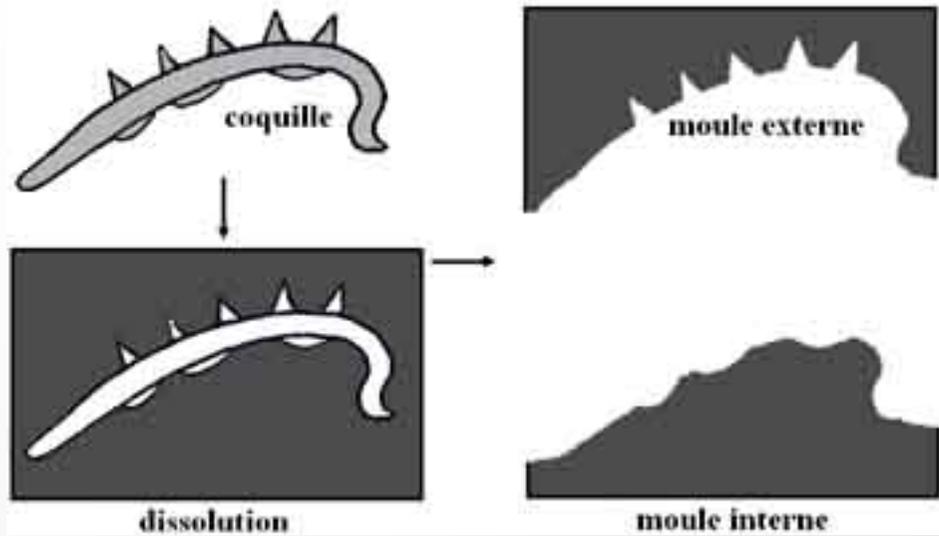
Cuvier, enseignant au Muséum



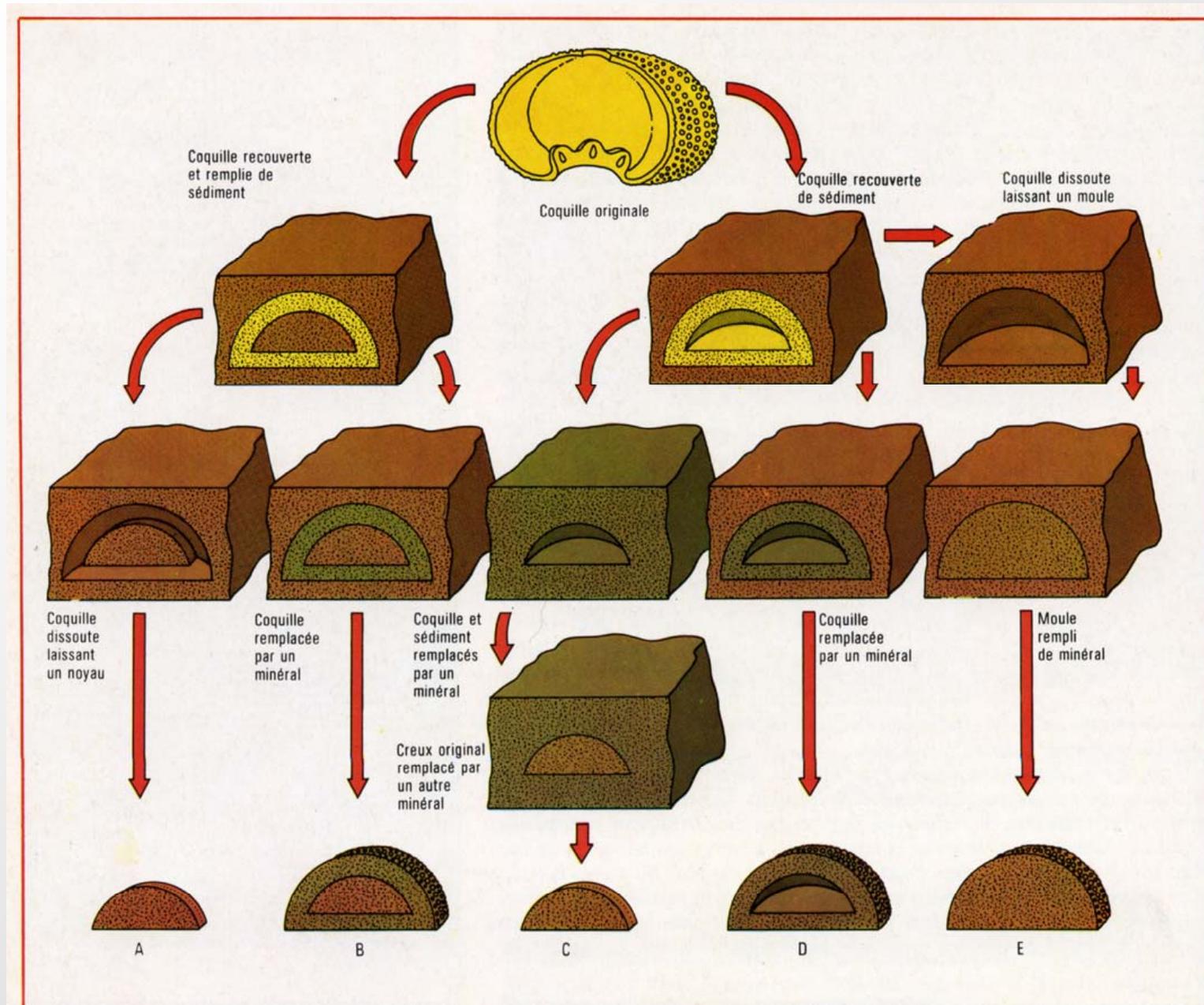
En 1802, la chaire d'anatomie des animaux, au Muséum, est vacante. Elle est immédiatement proposée au jeune Cuvier, qui enseignait déjà l'histoire naturelle à l'école centrale du Panthéon, puis au Collège de France (ci-contre). Le nouveau professeur fait donner à sa chaire le nom d'« anatomie comparée ».

Ci-dessous, une planche de son *Mémoire sur les éléphants*.

La fossilisation (1)



La fossilisation (2)



Comment se déroule la fossilisation

1. Mort de l'organisme

2. Évolution *post-mortem*

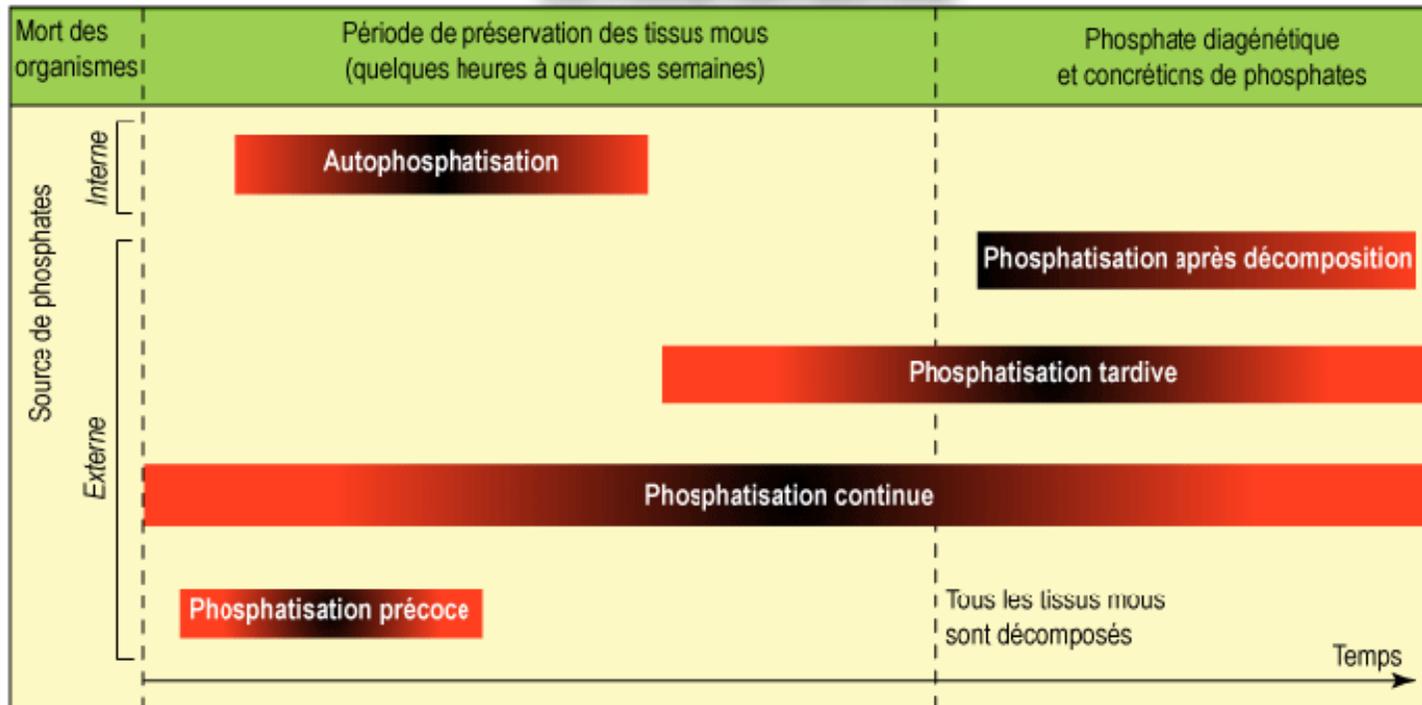
- Transport (déplacement par divers agents)
 - Rôle destructeur
 - Dispersion
 - Démantèlement
 - Changement de milieu
- Sédimentation

3. Accumulation (facteur favorable)

- Accumulation (favorable : lumachelles)
- Soustraction aux agents de destruction
 - Agents physiques (courants, vagues, vent...)
 - Agents chimiques (-----> dissolution)
 - Agents biologiques (mangeurs de cadavres, fermentation bactérienne...)

Fossilisation exceptionnelle

LA PHOSPHATISATION



Ce sont essentiellement les **apatites** (phosphates de calcium), *hydroxyapatite* et *fluoroapatite*, qui interviennent dans la fossilisation. L'hydroxyapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ est le constituant minéral des os et des dents, et se rencontre en grande quantité dans les roches et les sédiments sous forme de débris. Relativement instable dans les sédiments, l'ion hydroxyle est souvent remplacé par un ion fluorure. La fluoroapatite, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ est abondante dans les roches sédimentaires, où sa proportion peut atteindre 30%. Aux ions PO_4^{3-} peuvent se substituer fréquemment des ions CO_3^{2-} , donnant ainsi des mélanges de carbonate et de phosphate de calcium.

Dans le processus de phosphatation, la source de phosphate peut être interne - liée à la décomposition progressive des propres tissus de l'animal - ou externe; les phosphates peuvent en effet précipiter à partir de la colonne d'eau ou à partir de l'eau contenue dans les sédiments.

L'**autophosphatation** se déclenche très peu de temps après la mort de l'animal, puisque le phosphate provient de ses propres tissus.

Les phosphates de calcium "biologiques" sont d'ailleurs très répandus chez les Vertébrés comme chez les Invertébrés: la coquille de certains Brachiopodes, ou la cuticule minéralisée de certains Arthropodes Décapodes (Crabes...) peuvent en contenir. Le phosphore représentant un élément essentiel à la vie, les squelettes phosphatés peuvent aussi servir de réserves de phosphore. L'hydroxyapatite des os et des dents des Vertébrés se forme par fixation de microcristaux sur une trame organique essentiellement collagénique.

Pour que la phosphatation débute, il faut donc attendre que la décomposition commence, et libère ces phosphates "biologiques". Elle ne peut cependant durer longtemps si l'animal reste la seule source de phosphate. Le processus s'arrête dans ce cas avant la décomposition complète des tissus. Lorsque la source de phosphate est extérieure (phosphate dissous dans les eaux océaniques), la fidélité de la préservation est améliorée, puisqu'elle peut débiter dès la mort de l'individu, avant même que les tissus ne subissent les premières étapes de la décomposition. Ce processus pouvant durer sur de longues périodes, des organismes à différents stades de décomposition peuvent être préservés.

Si la phosphatation commence tard, seuls les tissus les plus résistants ou les plus facilement phosphatisés (les plus riches en collagène) seront préservés. Si elle a lieu après la décomposition complète des tissus mous, les vides laissés dans les tissus biominéralisés peuvent se remplir de phosphates diagénetiques ou de concrétions de phosphates.

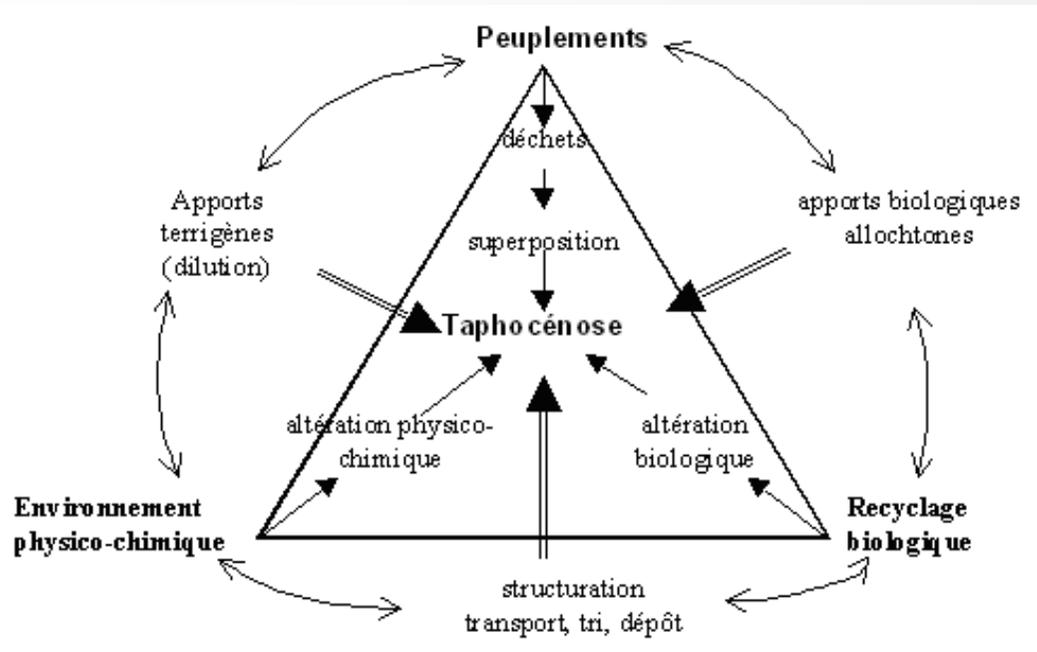
Évolution post-sédimentaire (diagenèse, métamorphisme, tectonique)

- Remplacement du minéral constituant le fossile par un autre minéral (= **épigénie**)
 - **Calcite** stable à la surface de la Terre
 - **vs. aragonite** moins stable (Nombreux mollusques au départ en aragonite, au final en calcite)
- Dissolution - recristallisation
- Déformation (pression...) : **dubiofossile**
- Si l'on veut retirer des informations des fossiles, il nous faut comprendre à quel point l'enregistrement fossilifère représente fidèlement la communauté biologique initiale.
- **Taphonomie** : ensemble des études sur les processus de fossilisation

Taphonomie

1. **Biocénose** : Toute la communauté biologique vivante et ses interactions
 - Mort des organismes. Perte d'information sur les interactions (un carnivore mort ne mange pas un herbivore mort).
2. **Thanatocénose** : Ensemble mort.
 - Décomposition et action des charognards et carnivores. Perte d'information sur les tissus mous.
3. **Ensemble mort temporairement préservé à la surface.**
 - Enfouissement. Perte pendant le transport.
4. **Ensemble enfoui.**
 - Fossilisation. Perte par érosion, métamorphisme, enfouissement en profondeur et fusion des roches sédimentaires...
5. **Taphocénose** : Fossiles existant à l'époque actuelle et pouvant être échantillonnés, étudiés.
 - Perte d'information due à la difficulté d'étudier certaines roches fossilifères (celles à grande profondeur ou en régions politiquement instables...).

Etude analytique de la taphonomie



Roux M., *Géochronique* n° 58, 1996

- Données
 - Abondance des fossiles dans un gisement
 - Quantification
 - Orientation des fossiles
 - Position allochtone ou autochtone
 - Granulométrie des restes
 - Position par rapport aux figures de sédimentations
- Les fossiles peuvent donner une image déformée de la vie passée

Notion de taphonomie : biais lié à la fossilisation

Quantitatif

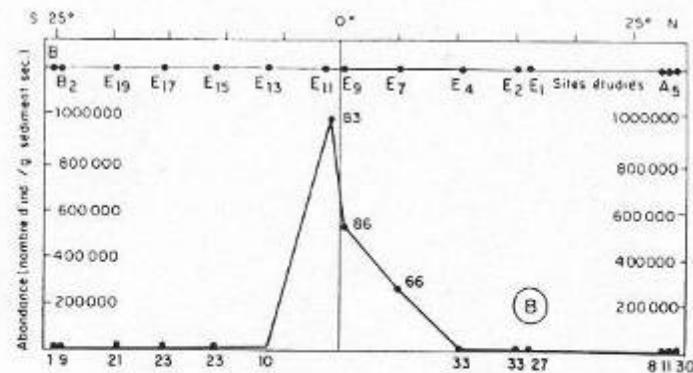
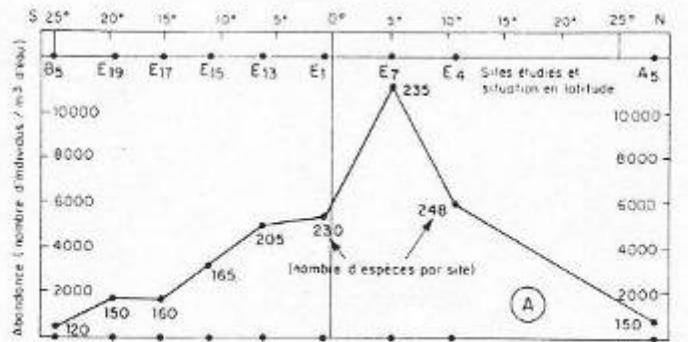


FIGURE 1

Comparaisons entre biocénose et thanatocénose. A) faune de Radiolaires pêchée de part et d'autre de l'équateur dans le Pacifique. B) Thanatocénose draguée dans la même région. Les deux populations diffèrent notablement, les formes dissoutes (part-mouvent) ne sont pas quelconques, ce sont les espèces les plus fragiles — à test plus fins — qui disparaissent, elles peuvent être les plus abondantes en individus. La thanatocénose interdit donc reconstituer la biocénose. D'après Renz (1978) in De Wéver, 1982, p. 44, fig. 21.

Qualitatif

3 types de foraminifères, selon leur test :

- Porcelanés: petits cristaux calcite
- Hyalins: gros cristaux de calcite
- Agglutinés: agglomération de minéraux détritiques

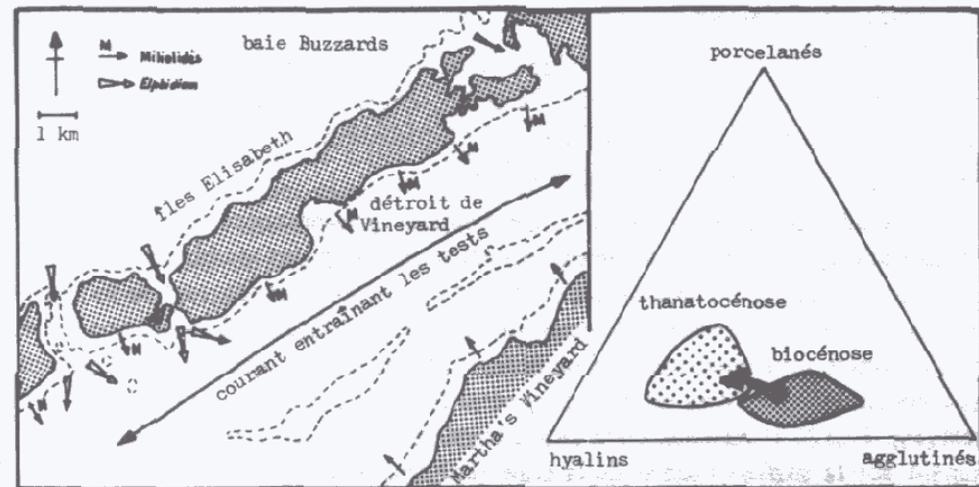


FIGURE 12.14 : Biocénose et thanatocénose de Foraminifères benthiques dans le détroit du Vineyard (côte orientale des U.S.A., entre Boston et New-York). Dans l'axe du détroit, la biocénose compte 20 à 50 % de formes fixées (*Eggerella*, *Trochammina*) et quelques *Rosalina*. Aux mêmes endroits, la thanatocénose montre un pourcentage plus faible (4 à 30 %) de formes fixées mélangées à des *Miliolids* et des *Elphidium*. Ces derniers, vivant dans les aires littorales, ont été apportés par les courants de marées.

D'après J.W. Murray (1976, *Foraminifera*, 2, R.H. Hedley & C.G. Adams ed., London, Acad. Press, p. 78 - 79, fig. 13 - 14), modifié.

Biais taphonomique : exemple

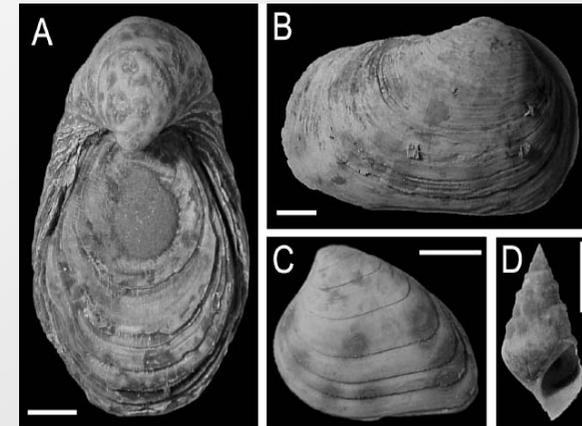
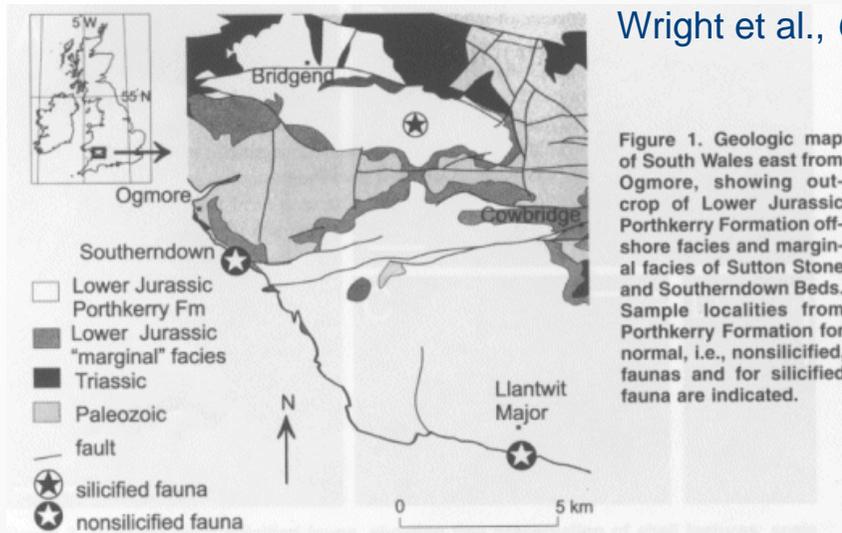


Figure 3. Molluscs from silicified fauna, showing fine preservation of shell features; scale bars represent 1 cm. Note beekitized patches on shell in A and C. A: *Gryphaea arcuata*, dorsal view. B: *Pholadomya glabra*, right valve. C: *Cardinia listeri*, left valve. D: *Allocosmia*.

- La figure 2 résume les résultats d'une étude portant sur trois sites fossilifères anglais (figure 1) ayant fourni une abondante faune de Mollusques. Les trois sites correspondaient *a priori* au même environnement initial.

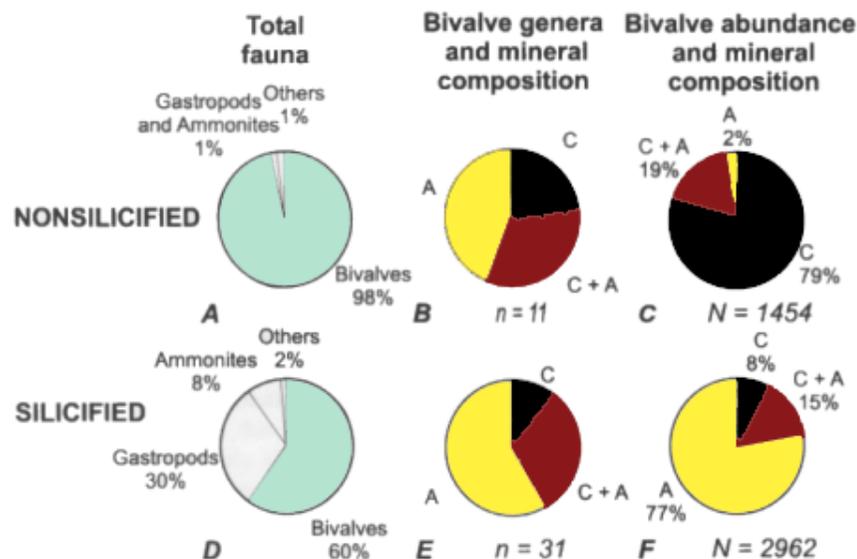


Figure 2. Pie diagrams for nonsilicified Porthkerry Formation faunas (A–C) and for silicified faunas (D–F), showing composition of total fauna (A, D), shell mineral composition for bivalve generic diversity (B, E; n = no. of genera) and for bivalve abundance (C, F; N = no. of individuals). Shell minerals: C—calcitic; C + A—bimineralic; A—aragonitic.

- Commentez les résultats de la figure 2.
- Expliquez les différences constatées. Quel(s) site(s) est (sont) le plus représentatif de la biocénose initiale ?

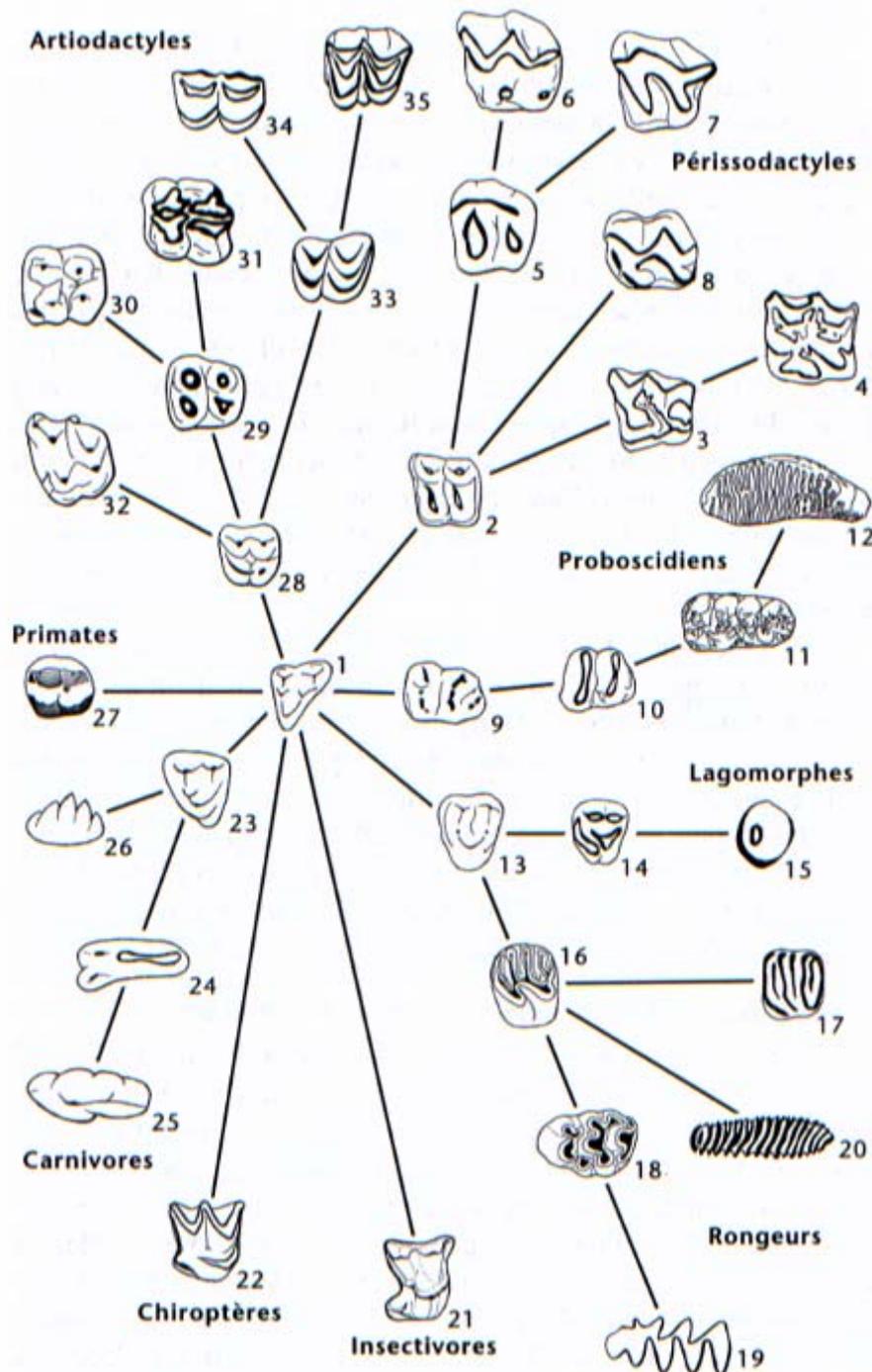
Comment les classer ? Notion d'espèce en paléontologie

- Définition de l'espèce biologique :
 - Mayr : « 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. »
- Notion d'interfécondité pas forcément simple à utiliser pour la paléontologie.
- Espèce paléontologique :
 - Définition typologique : définie à partir d'un groupe d'individus avec un individu moyen et on regarde un certain nombre de paramètres morphologiques qui doivent ressembler.
 - Idée : 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.

Les caractères et leur variabilité

- Caractères **quantitatifs**
 - Grandeurs discontinues (nb de côtes, présence-absence)
 - Grandeurs continues (L, l, h, angles...)
- Caractères **qualitatifs**
 - Morphologie (contour du test, ornementation...)
- Variabilité individuelle, écologique, accidentelle, dimorphisme sexuel...
- Analyse factorielle et biométrie.

Identification à partir d'une partie de l'individu parfois



- La radiation des Mammifères : une radiation des adaptations dentaires.
- Les dents mammaliennes : des fossiles abondants et bavards.

Notation de l'espèce en paléontologie

- Nomenclature linéenne :
 - Binominale
 - Nom de genre + nom d'espèce :
 - Genre espèce
 - Exemples :
 - *Orthoceras regulare*
 - *Diceras arietinum*



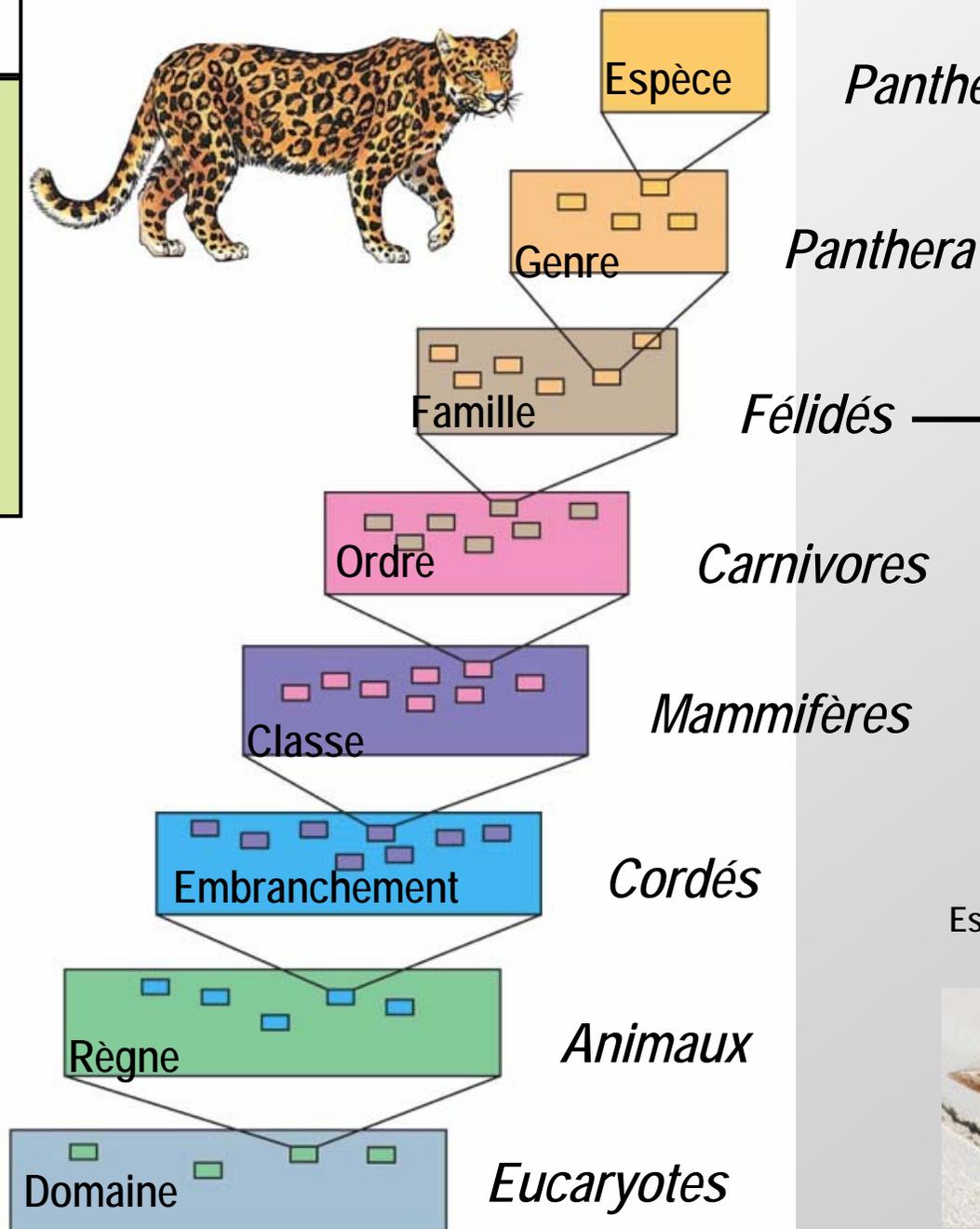
Orthoceras regulare



Diceras arietinum

Truc mémo

Domanus régnait sur les embranchements et les classes mais l'ordre des familles générant les espèces !



Panthera pardus

Panthera

Félidés

Carnivores

Mammifères

Cordés

Animaux

Eucaryotes

La famille des félidés regroupe (4) genres : felis, lynx, acinonyx (jaguar) et panthera.

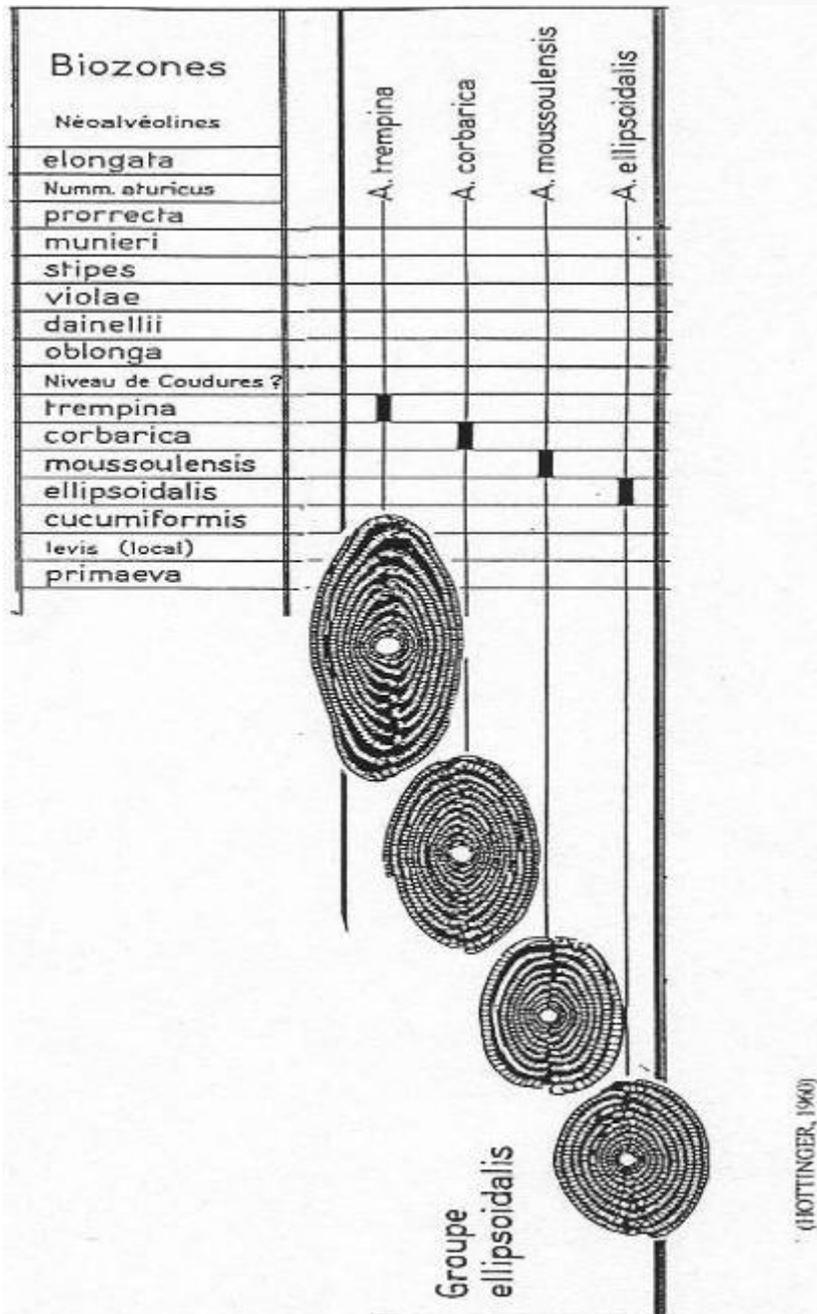


Espèce : *Panthera leo* (lion)



Espèce : *Felis silvestris* domesticus

Problème 1 : Variabilité de l'espèce dans l'espace et au cours du temps

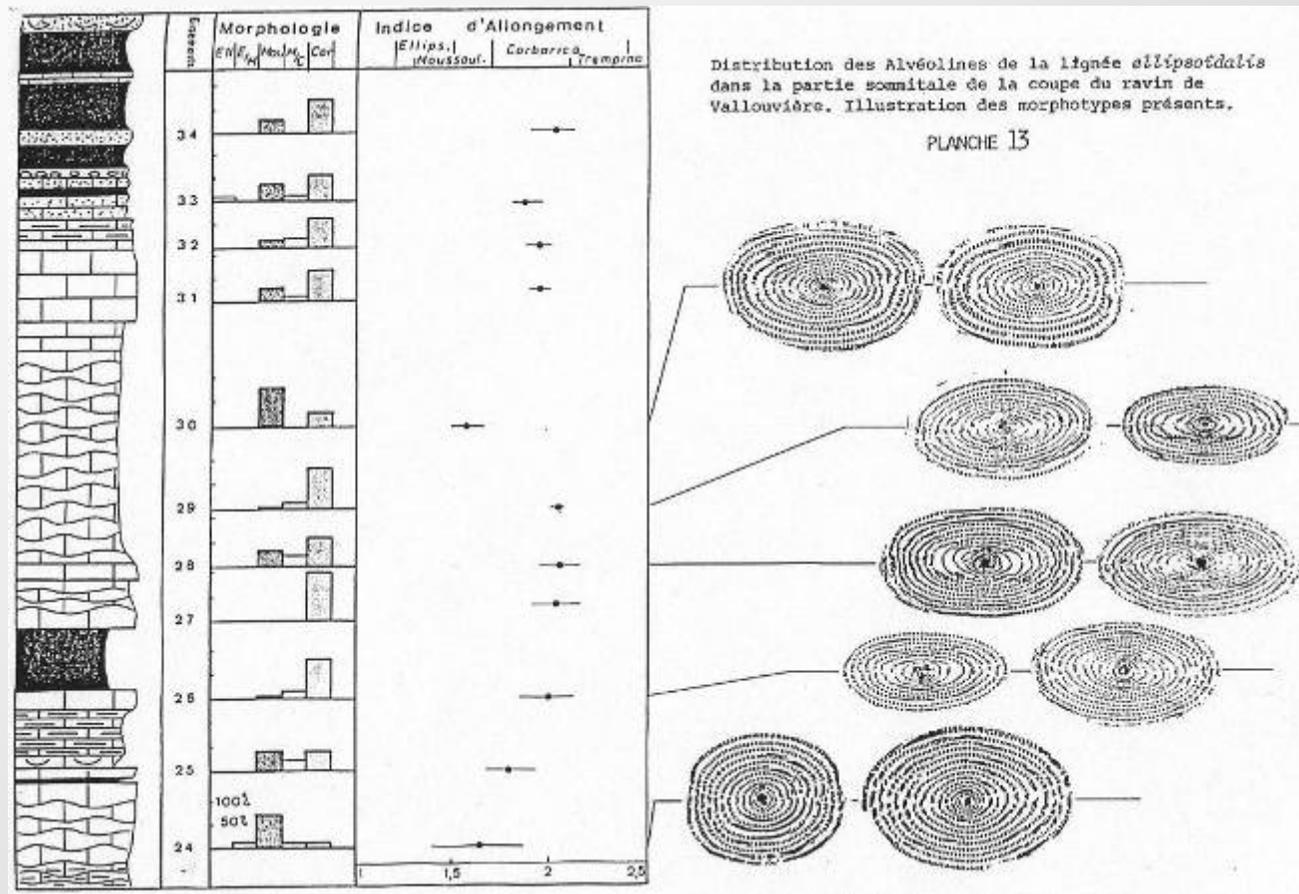


Exemple : Les alvéolines de l'éocène

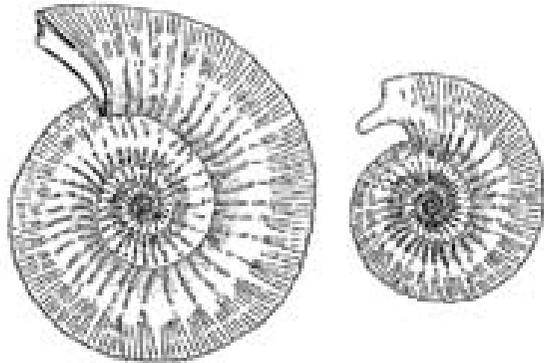
- On a diverses lignées et, pour le groupe *ellipsoidalis*, quatre espèces se succèdent dans le temps. Elles ont été décrites en 1960 par un suisse (Hottinguer).
- Espèce 1** : *A. ellipsoidalis* (1883-Egypte) 6 millions d'années. Description : coquille de petite taille, peu allongée, spire serrée et petite loge initiale.
- Espèce 2** : *A. 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** : *A. corbarica* (1960-dans les corbières, par Hottinguer). Description : encore plus grande, plus allongée, pôles pointus, spire serrée, loge initiale assez grande.
- Espèce 4** : *A. 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.

Problème 1 : Variabilité de l'espèce dans l'espace et au cours du temps

- Dans le Minervois, on constate que deux espèces peuvent cohabiter dans le même niveau.
- On a des morphologies intermédiaires entre les espèces.
- A t'on alors deux espèces qui coexistent ou des variations au sein d'une même espèce ?



Problème 2 : le polymorphisme

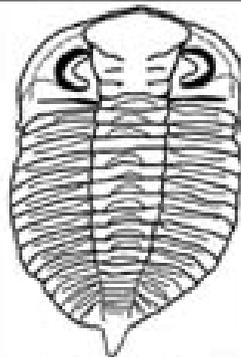


A Forme mâle Forme femelle

Polymorphisme sexuel



Protaspis



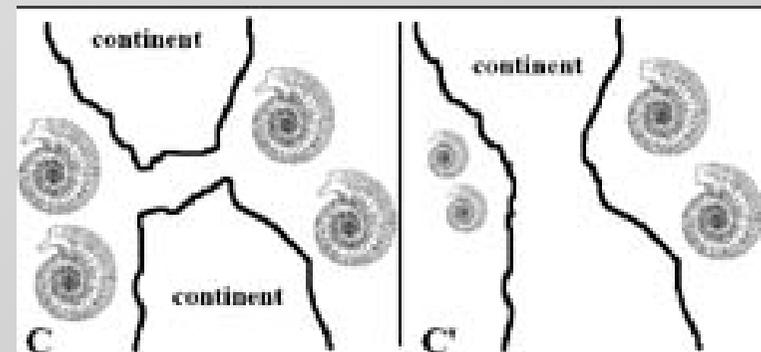
Holaspis

B

Polymorphisme lié au stade de développement : juvénile vs. adulte

Exemple de polytypisme : espèce scindée en 2 groupes, différences morphologiques mais interfécondité

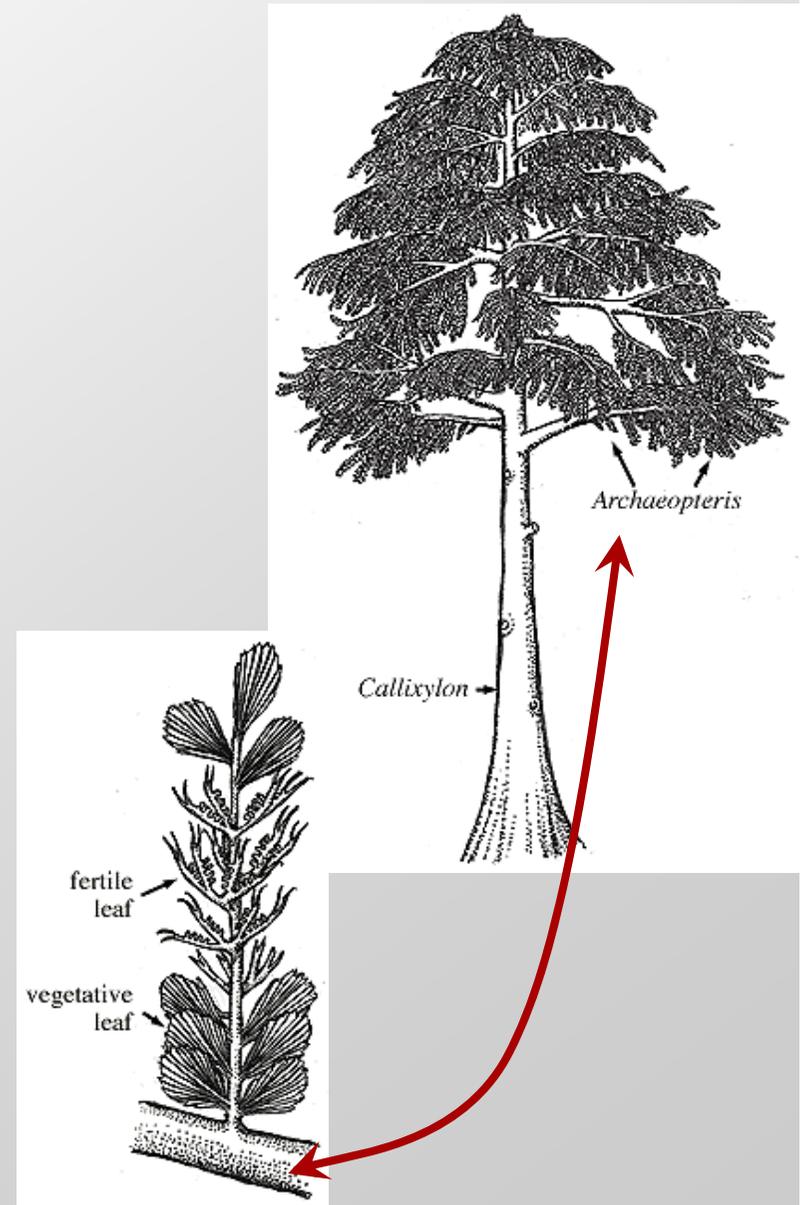
- Le **polymorphisme** : coexistence dans une même population d'individus interféconds mais morphologiquement différents.
- Le **polytypisme** : existence dans une même espèce de populations morphologiquement différentes (« races » géographiques).
- Les **espèces jumelles** : ce sont des ensembles morphologiquement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



Problème 3 : quand on n'a qu'une portion.

- Parfois certains fossiles sont assignés à plusieurs espèces alors qu'ils s'agit de différentes parties d'une seule espèce.
- Un exemple, tiré de *l'Encyclopaedia Universalis* (sous la rubrique Ptéridospermaphytes, p. 268) :
 - « On a donné le nom de *Lyginopteris oldhamia* à un appareil végétatif complet reconstitué en 1899 grâce à des connexions précises, découvertes dès 1874, entre des organes isolés connus sous les noms de genre *Sphenopteris* (feuilles), *Dadoxylon oldhamium* (bois secondaire), *Rachiopteris* (pétiole), *Kaloxylon* (racine). On a trouvé, en 1903 et en 1905, des continuités organiques, d'une part, entre ces tiges et des ovules que l'on désignait depuis 1876 sous le nom de *Lagenostoma* et, d'autre part, entre ces tiges et des organes polliniques connus depuis 1883 sous le nom *Crossotheca*. »
 - On avait donc pas moins de 7 noms pour diverses parties de la même plante !
- Parfois on ne sait pas où les classer jusqu'à ce que l'on retrouve l'organisme complet
 - Exemple des conodontes

Autre exemple : *Archaeopteris - Callixylon*



Bilan

- Toutes ces difficultés impliquent :
 - La mise au point de techniques d'étude de plus en plus sophistiquées (dégagement des fossiles, coupes numérisées, scanner tomographique, géochimie...)
 - Un échantillonnage toujours plus important (parfois une ré-étude des échantillons dans les labos)
- La paléontologie est sujette, comme les autres domaines de la science a des réinterprétations, à l'éclosion de nouvelles théories... Bref, c'est une science en marche.
- Nous verrons dans les prochains cours la quantité d'information qui peuvent être apportés par les fossiles.