



La limite Permien – Trias : LA crise majeure du monde vivant

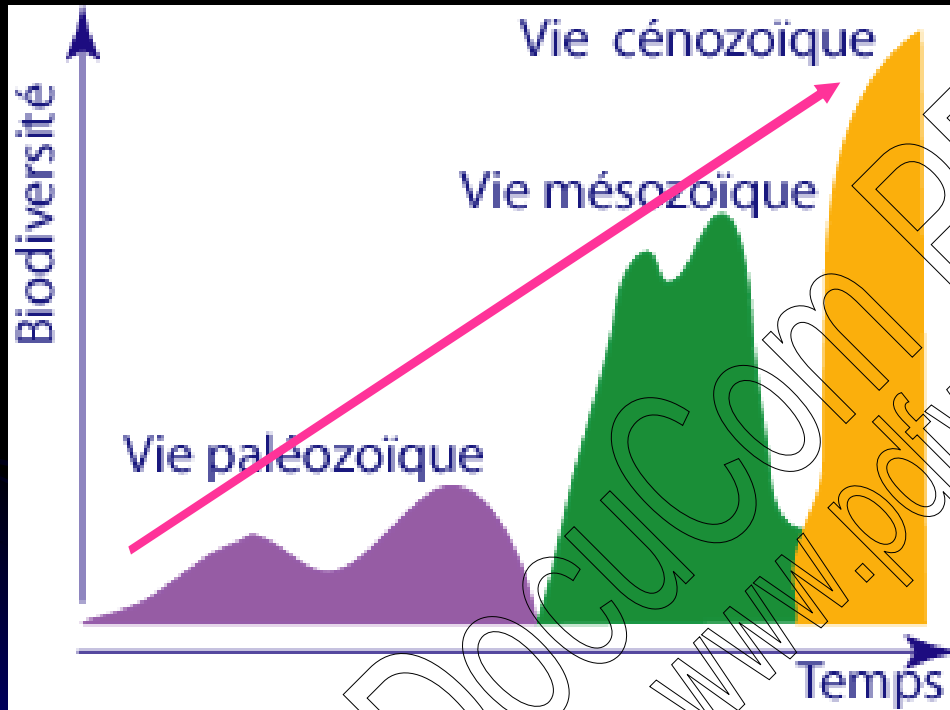
par

Sylvie CRASQUIN

Directeur de Recherche au CNRS
Université Pierre et Marie Curie
Paris

sylvie.crasquin@upmc.fr

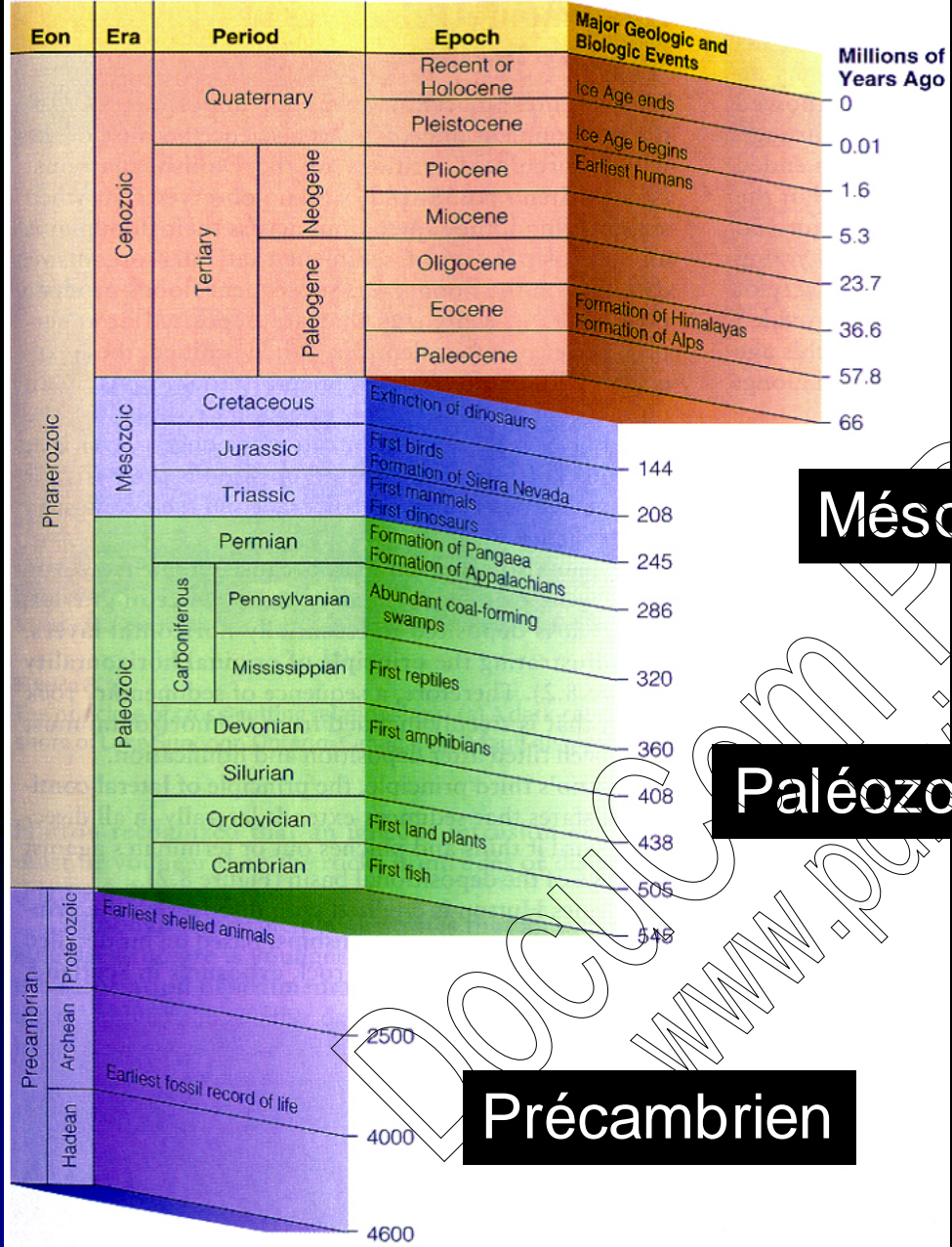




Les grandes divisions des temps géologiques (ou ères) définies dès 1840 par J. Phillips (qui n'avait aucune idée de la durée de ces ères) sont fondées sur les modifications biologiques.

De grandes chutes de la biodiversité apparaissent en creux.

L'augmentation globale de la biosphère est aussi notable.



Quaternaire

Cénozoïque (Tertiaire)

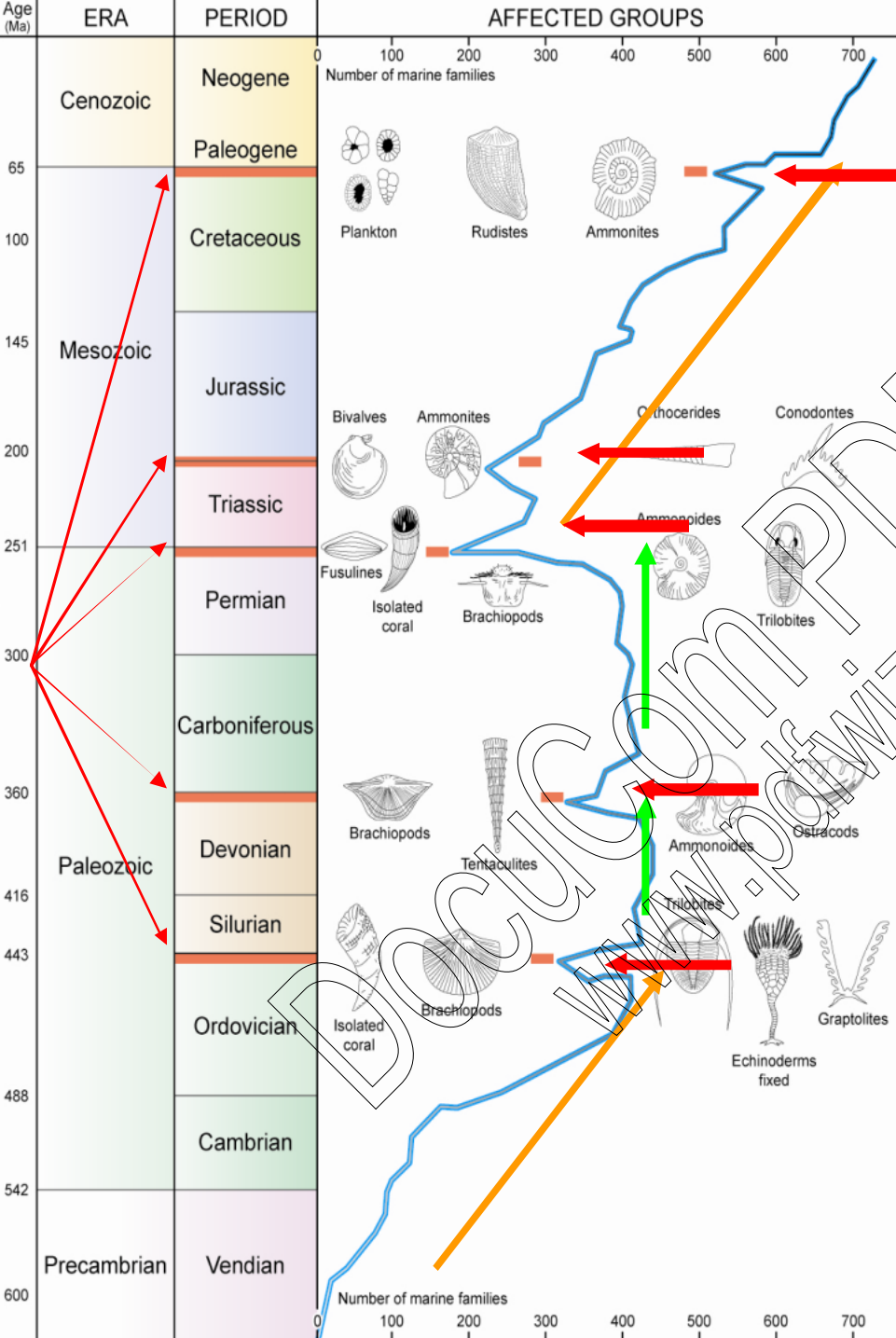
Mésozoïque (Secondaire)

Paléozoïque (Primaire)

Précambrien

Echelle des temps géologiques, construite pas à pas depuis plus de 200ans

5 crises majeures



L'évolution de la biosphère n'a pas été régulière au cours des temps géologiques:

- phases de diversification (Cambrien-Ordovicien et Jurassique-Crétacé)
- et de stabilité (Carbonifère-Permien)
- crises biologiques (5 majeures)

Crise : événement brutal et rapide

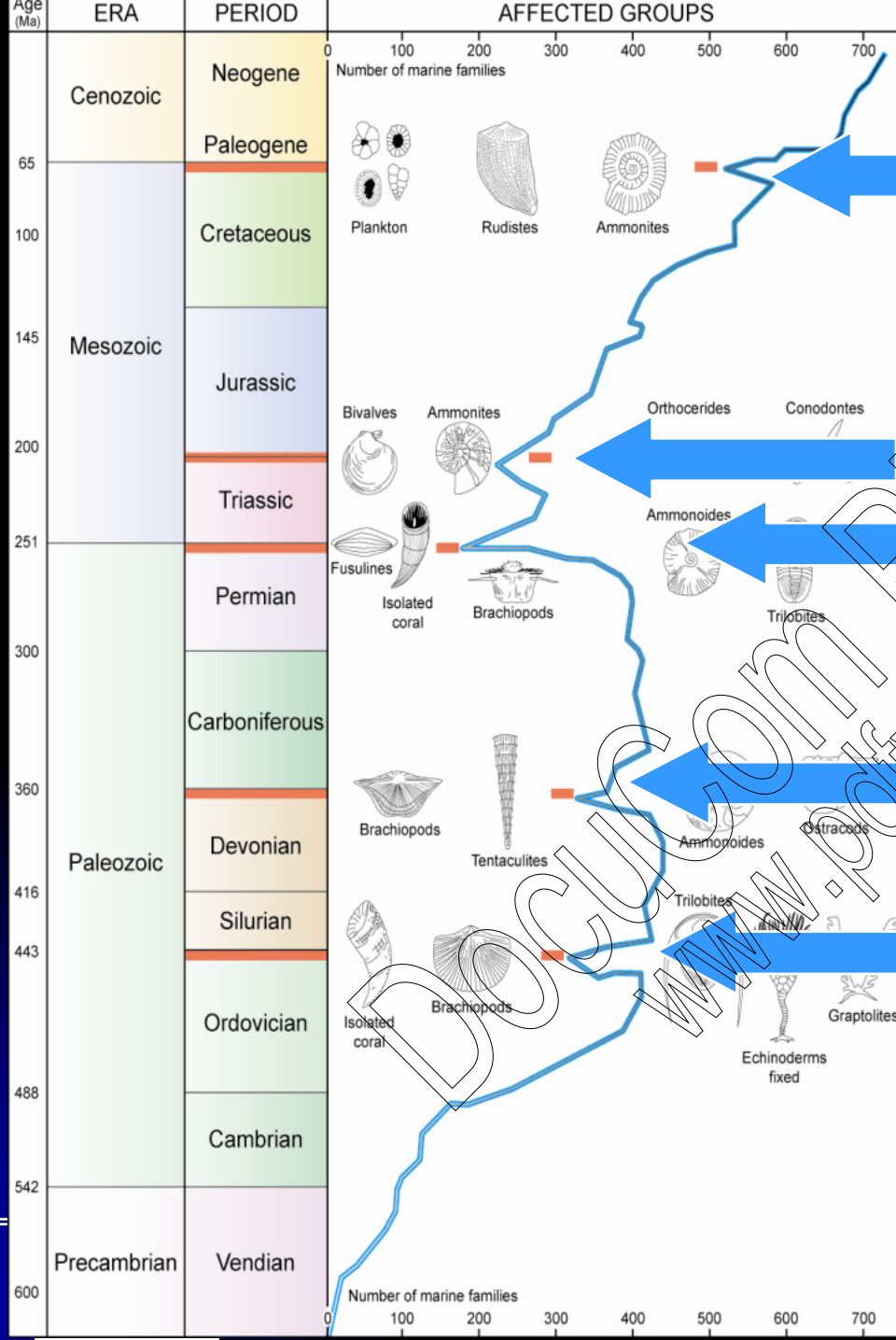
Crise biologique implique extinction en masse

Extinction en masse: 3 critères
classification, temporel et spatial

- ✓ disparition de rangs élevés (au moins famille) et à modes de vie différents ou chute drastique de la biodiversité (=nbr espèces, genres, familles) et de la biomasse
- ✓ cette crise doit se dérouler rapidement à l'échelle des temps géologiques (qq jours à 1 ou 2Ma)
- ✓ extinction en masse ressentie à l'échelle du globe ou sur de très grandes distances



Perte de familles marines



- ⑤ Crétacé/Tertiaire 65Ma 15%
- ② Trias/Jurassique 203Ma 23%
- ① Permien/Trias 251Ma 55%
- ④ Frasnien/Famennien 365Ma 21%
- ③ Ordovicien/Silurien 436Ma 22%

5 grandes crises



-251Ma

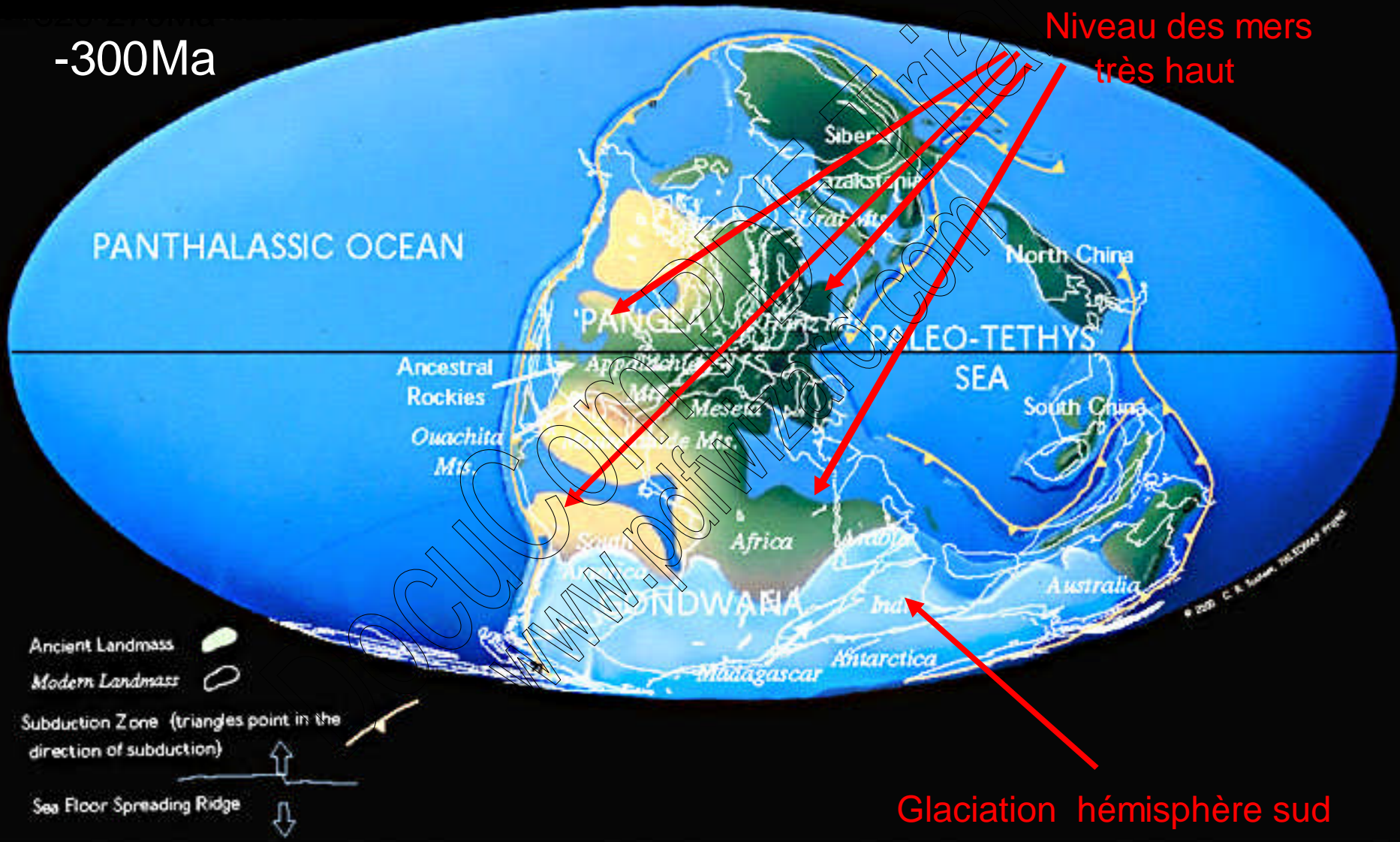
LA crise



Quelle était la situation avant les événements?

Carbonifère supérieur – Permien inférieur

-300Ma



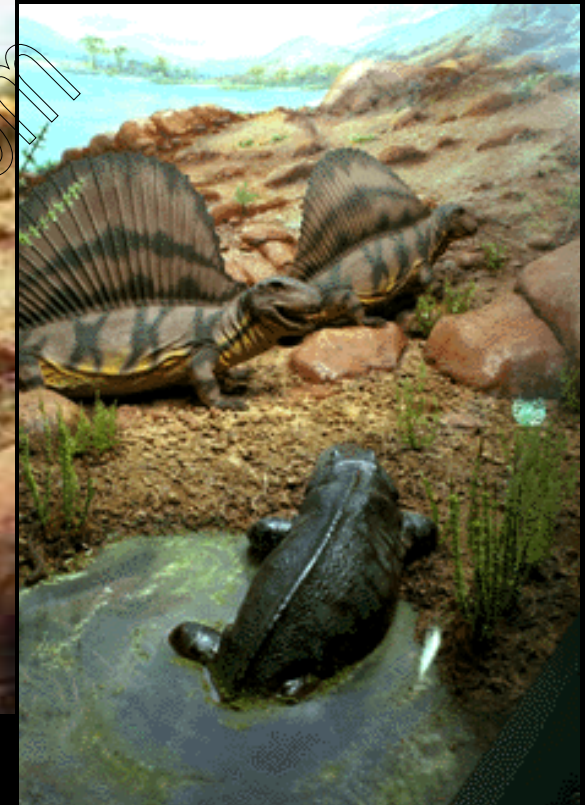
Permien

Sur terre



Calamites

Dimetrodon



Eryops



Reptiles herbivores

Reptiles mammaliens

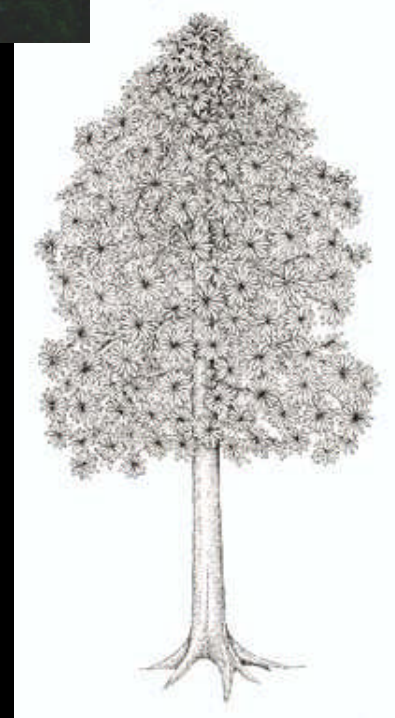
Reptiles carnivores





Urnetaflügel: *Sarcophaga anisomabocorum*
Westfälium C., Saar-Schichten
Rekonstruktion v. Kraus, 1996
Maßstab 1:1, Flügelspannweite 45 cm

La flore continentale est dominée par les conifères et des "fougères" géantes.
Arthropodes (Insectes) très abondants

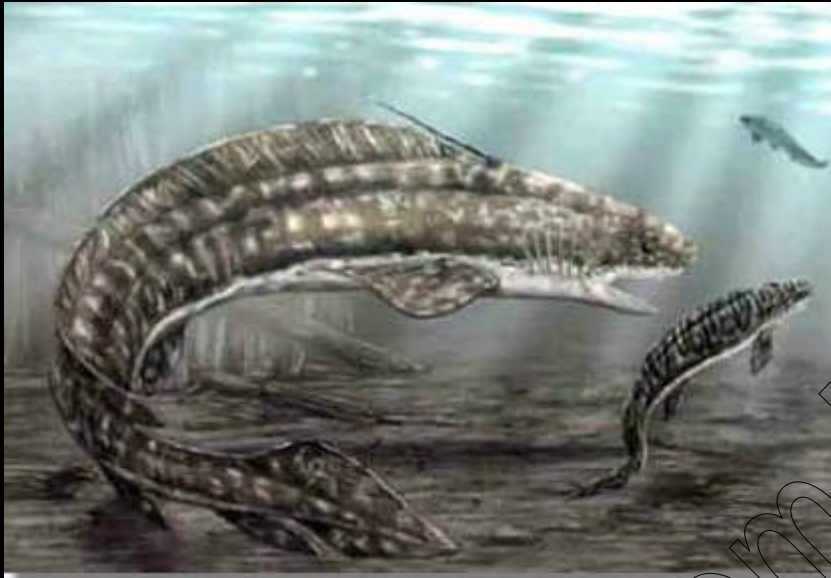


Glossopteris



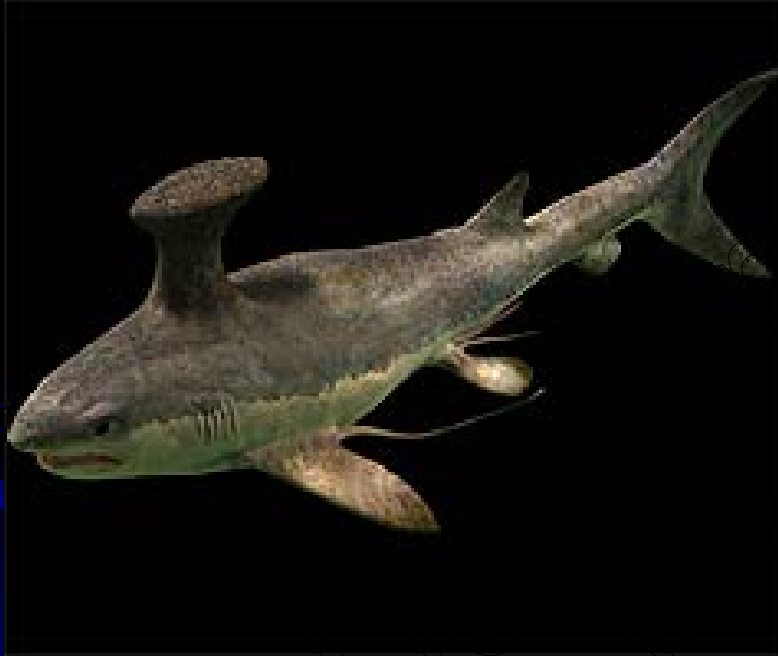
Arthropleura
© 2004 M. Harris, Science Center

En eau douce ou saumâtre



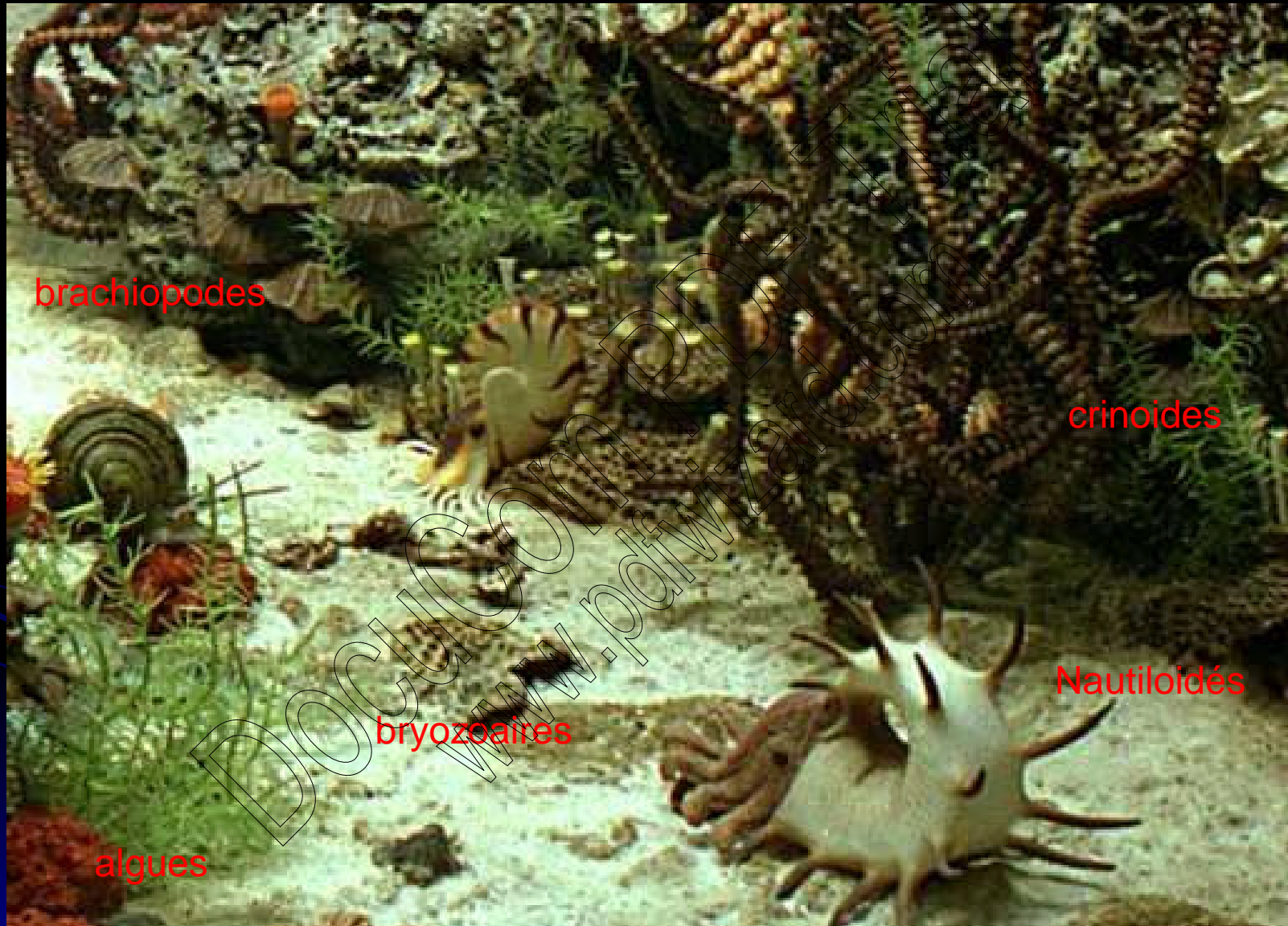
poissons osseux et cartilagineux

Dans les mers



poissons osseux et cartilagineux

Microfossiles: foraminifères – fusulines, ostracodes, conodontes, radiolaires, ...



brachiopodes

crinoides

Nautiloidés

bryozoaires

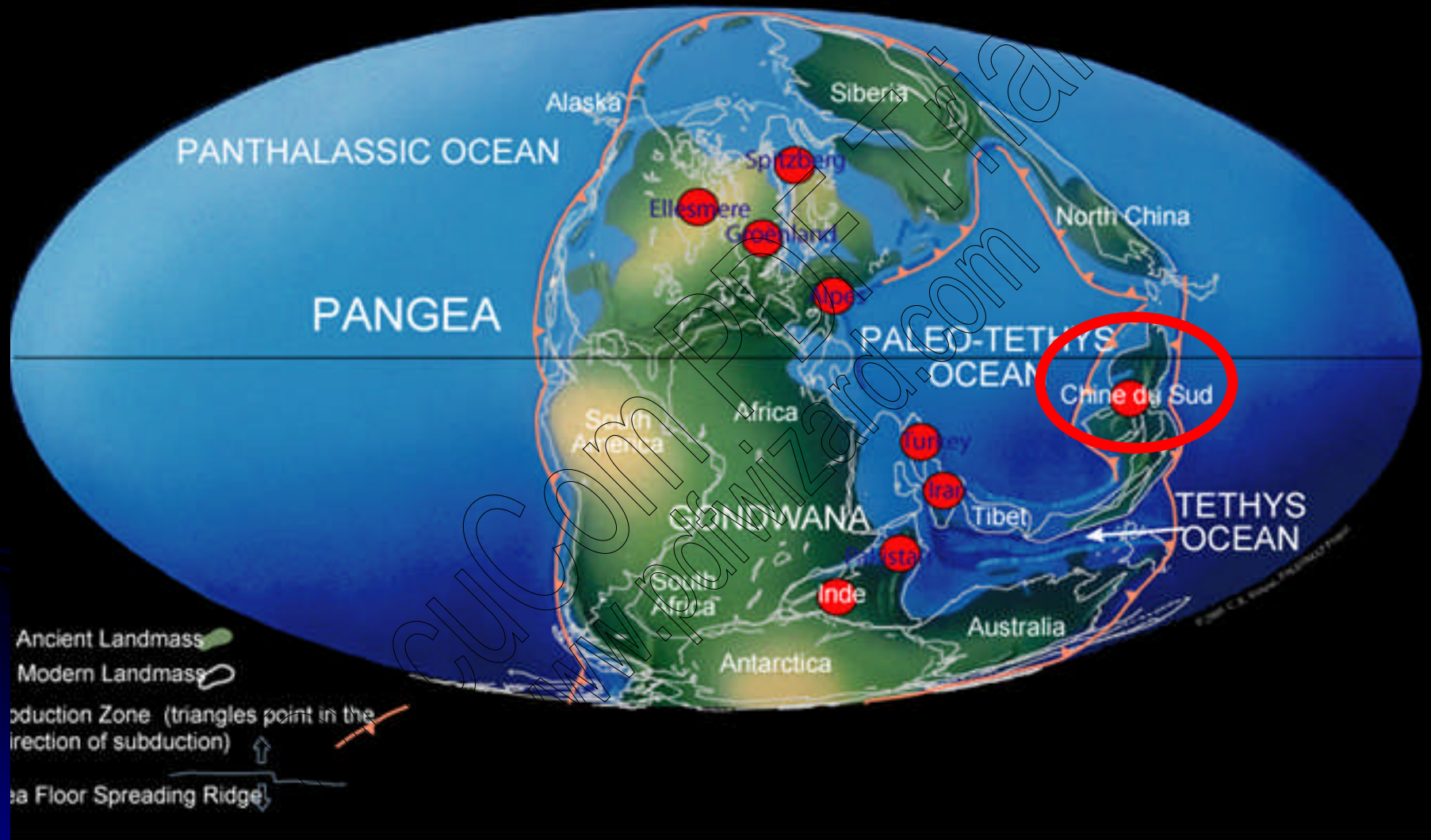
algues

An underwater photograph showing a diverse marine ecosystem. In the foreground, there is a dense, dark-colored coral reef with many small, orange-tipped polyps. Behind this, several tall, yellow, cylindrical sponges stand vertically. The background is a clear, light blue water column. A white box with a blue border is overlaid on the right side of the image, containing text in red. A large, faint watermark 'www.compdf.fr' is visible across the center of the image.

Éponges et coraux divers

**Vie fixée
ou posée
sur le fond**

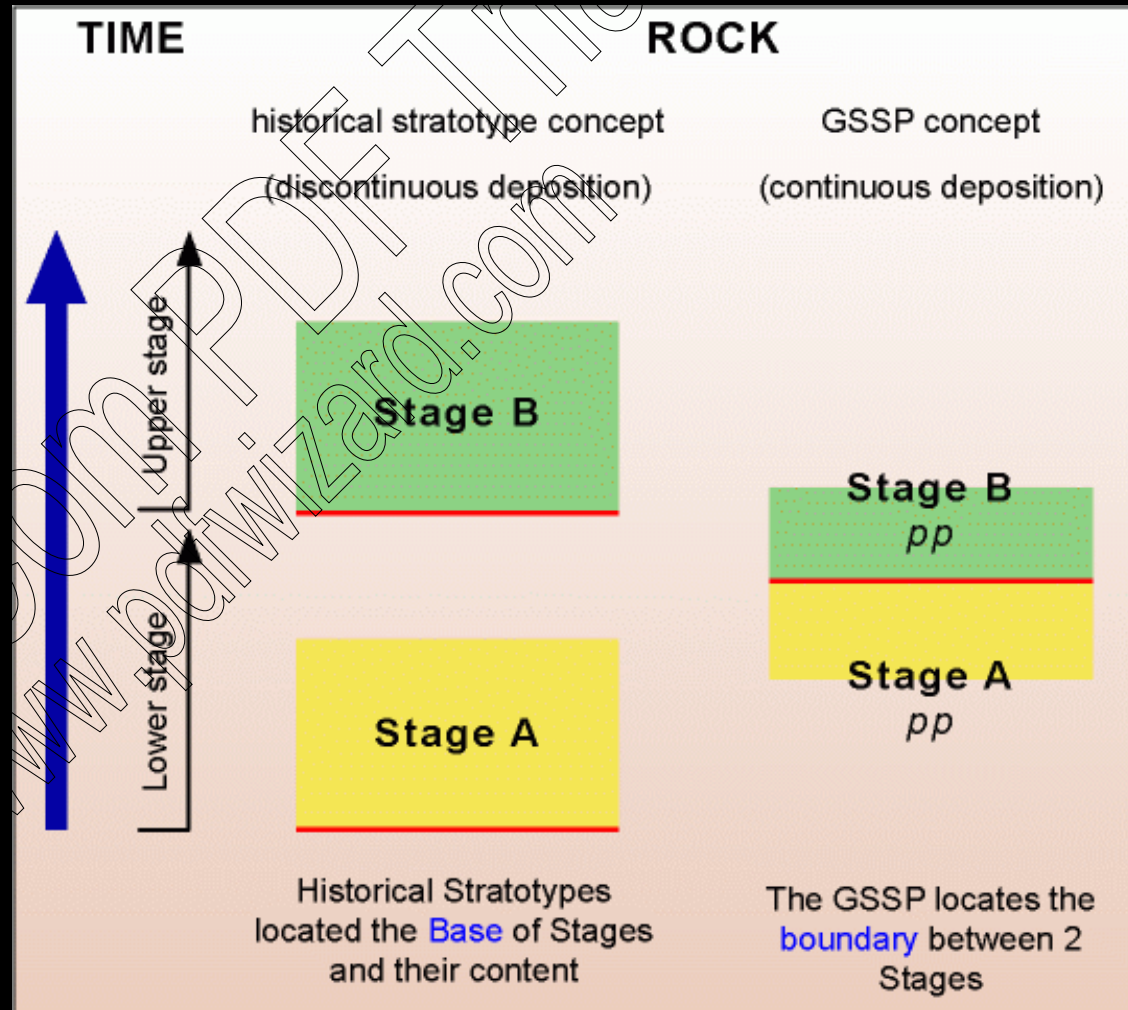
Late Permian 255 Ma



Sites où la limite P-T est observable en milieu marin

Des stratotypes aux GSSP

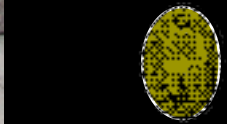
- Stratotypes de couches : lacunaires
- Points stratotypiques : clous d'or, stratotypes de limite



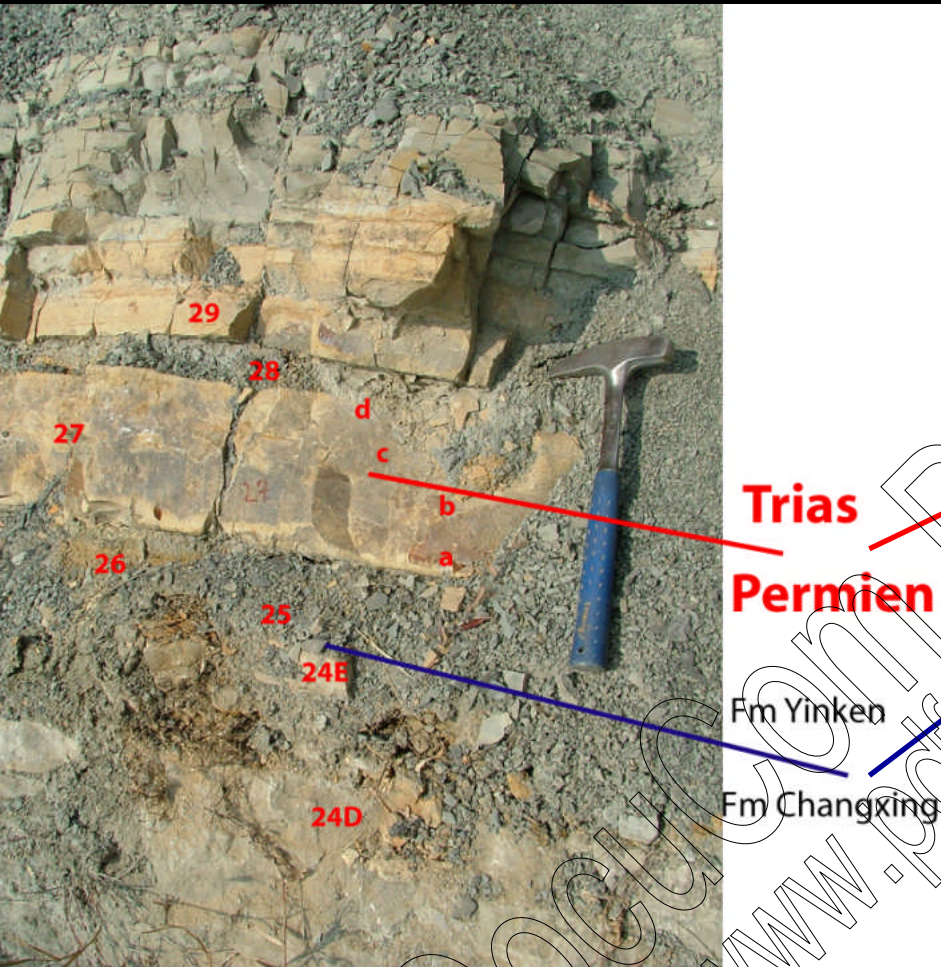


Clou d'or de la LPT
Chine du Sud - Meishan

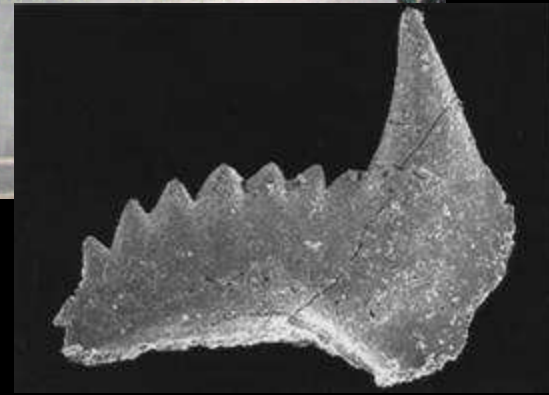
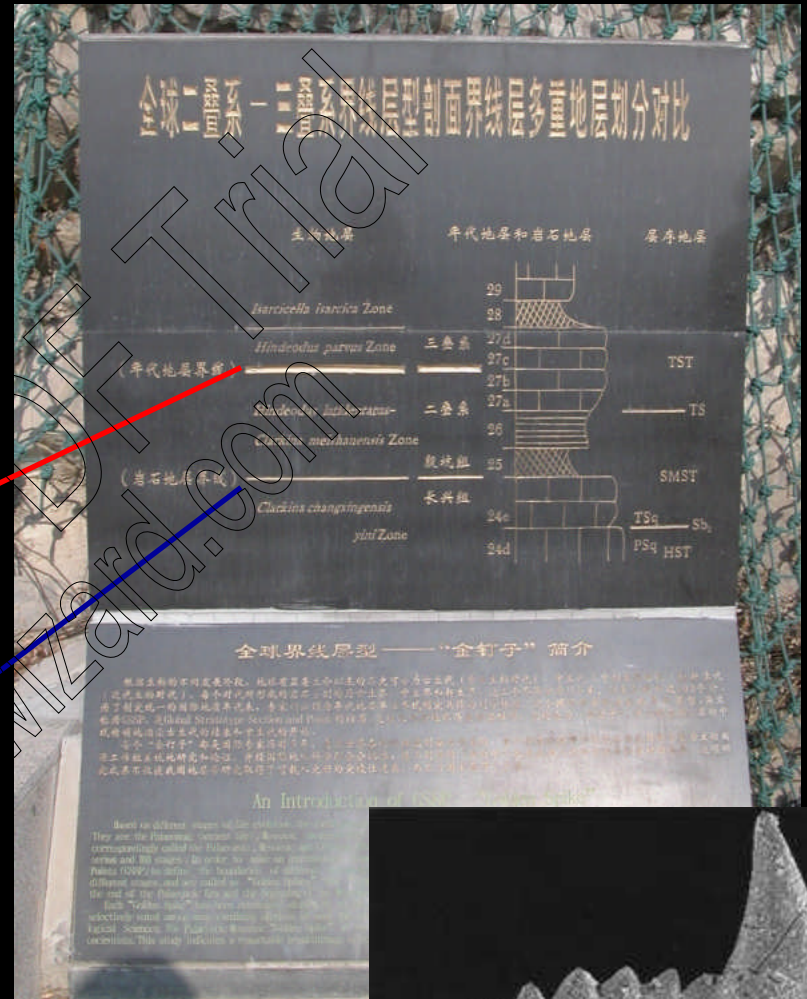








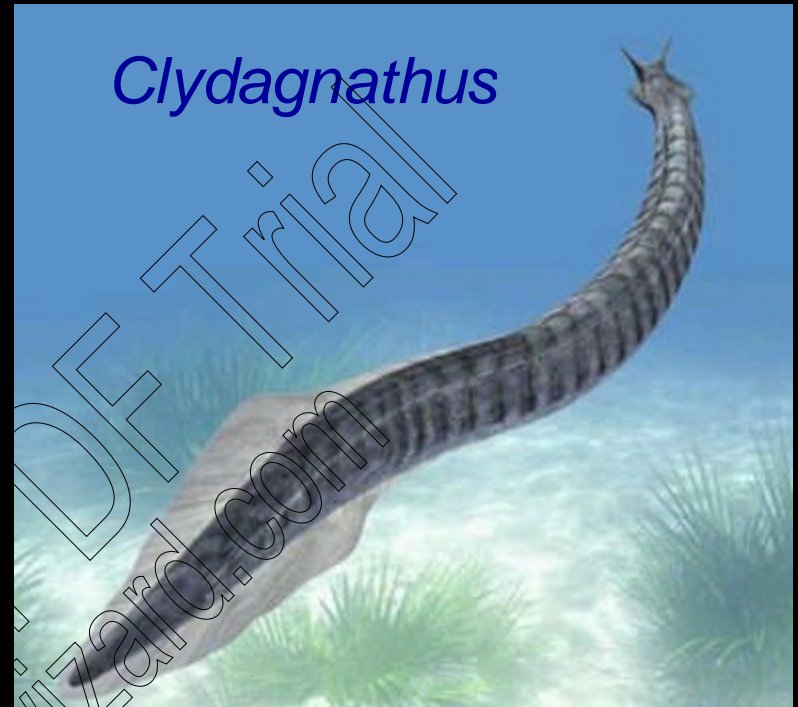
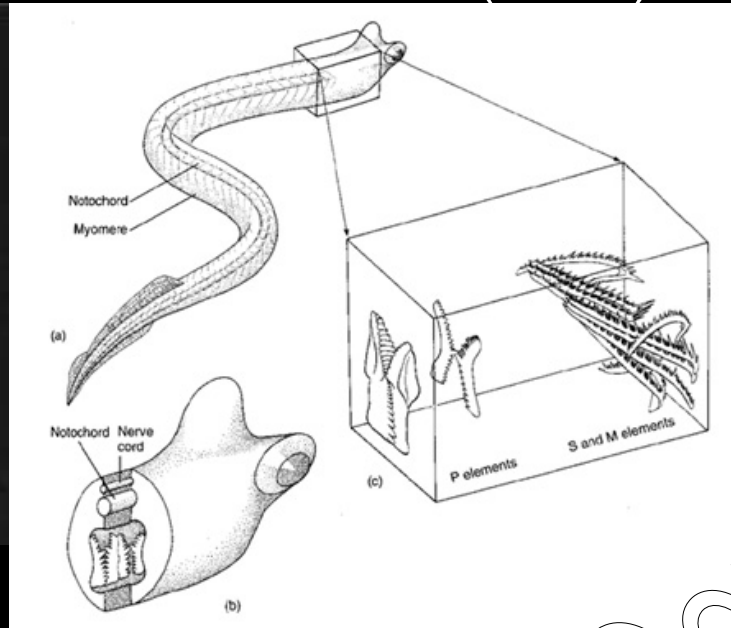
Trias
Permien
 Fm Yinken
 Fm Changxing



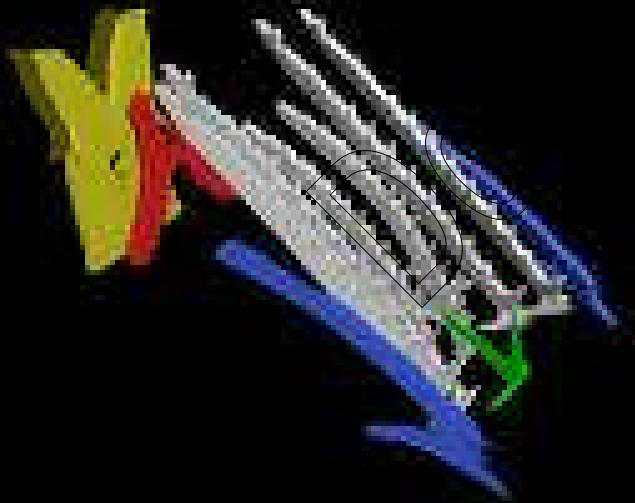
Détail LPT Meishan

FAD *Hindeodus parvus*

Phosphate de calcium British Museum (1980)

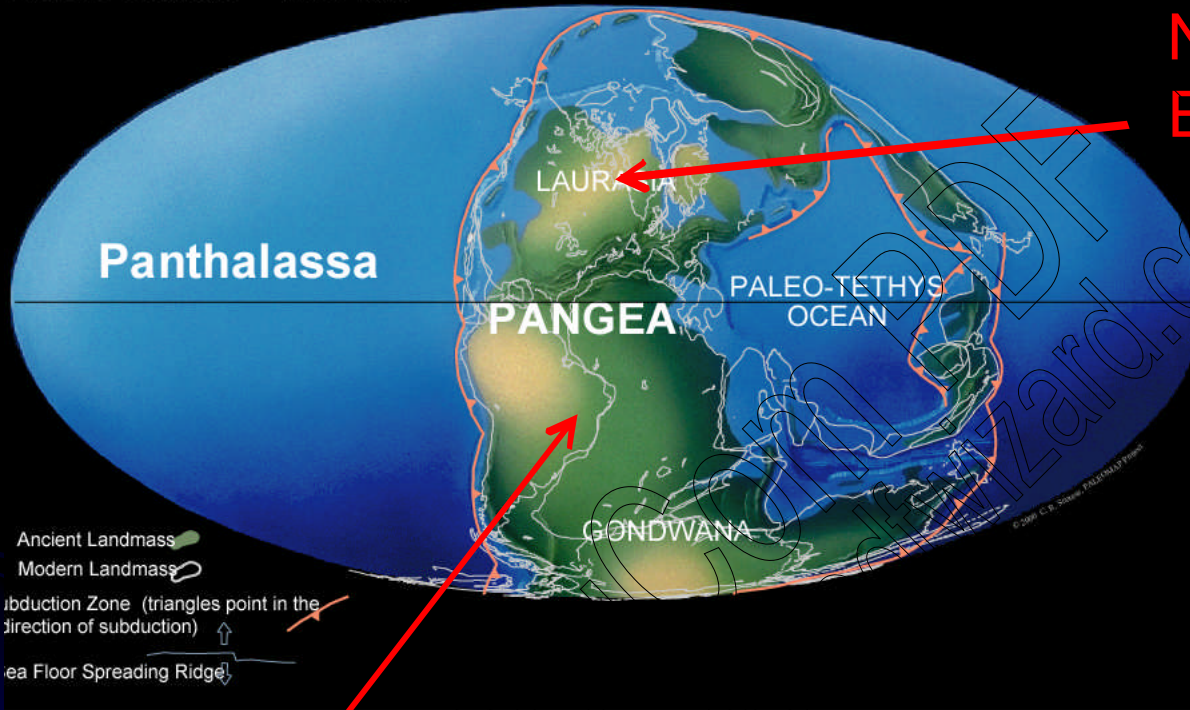


Vertébrés primitifs
Proches des Agnathes



Paléogéographie : une configuration unique

Late Permian 255 Ma



Laurasia: Amérique du Nord, Groenland, Europe avec la Sibérie

La Pangée est le résultat d'une suite de collisions continentales débutées au Silurien et se terminant au Permien terminal par la formation des Ouralides

Gondwana: Amérique du Sud, Afrique, Inde, Australie, Antarctique

La Panthalassa, large de 20000km à l'Équateur est parsemée de nombreux archipels (volcans – sea mounts et/ou fragments cratoniques - terranes)

La biosphère subit sa plus grande crise des temps phanérozoïques

Le milieu marin

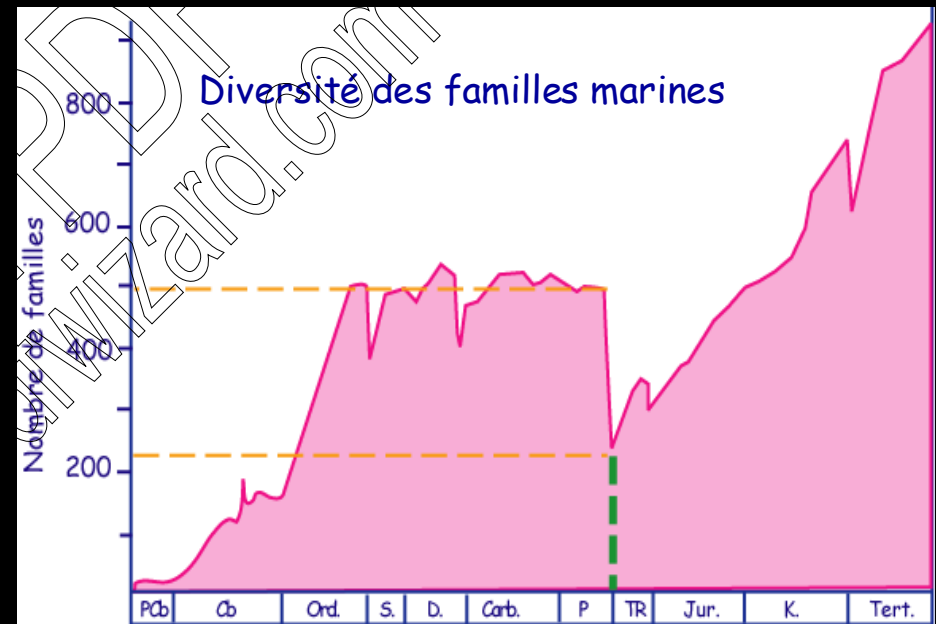
55% des familles présentes dans le Permien

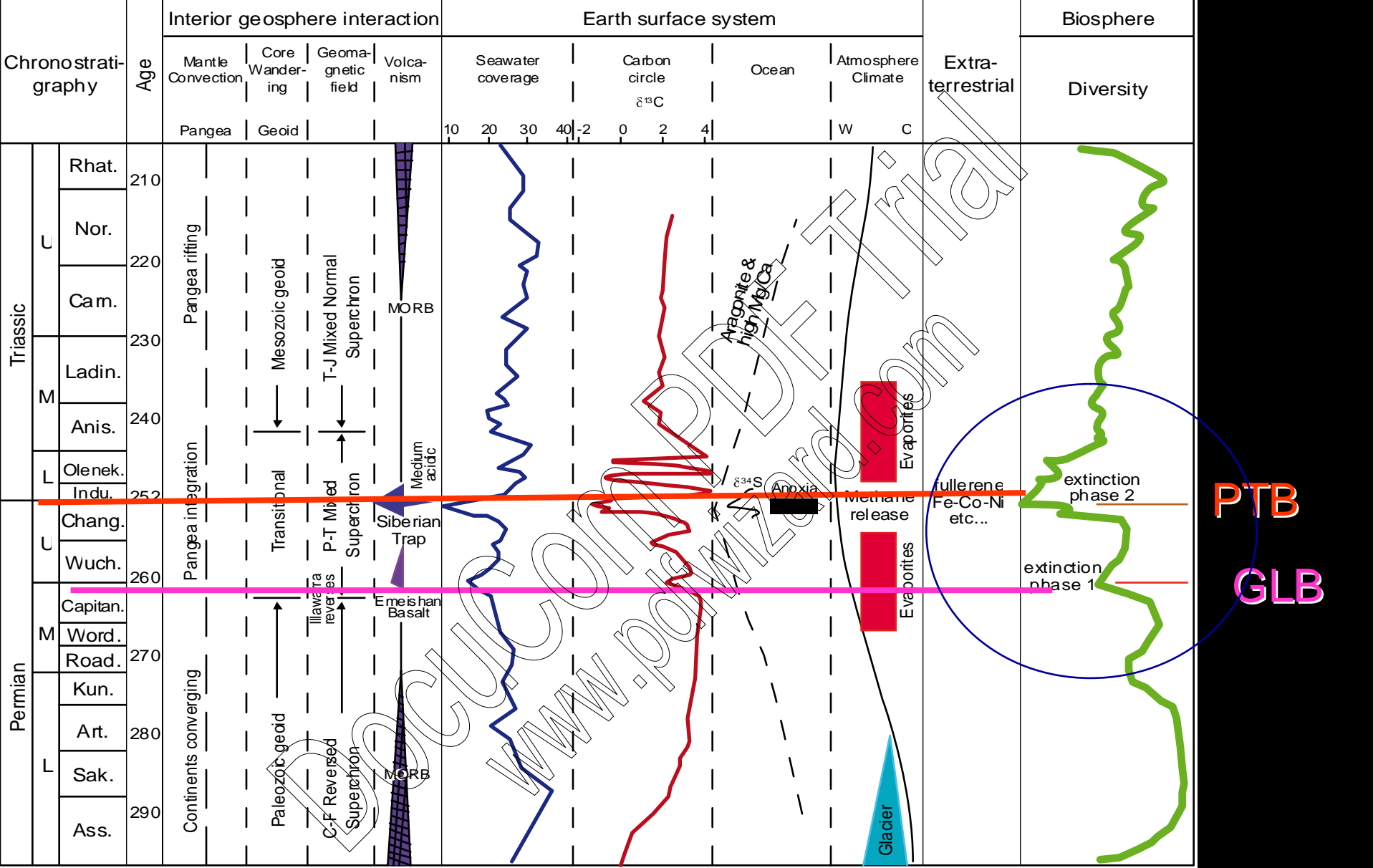
disparaissent au Trias

Certaines extinctions débutent dans le Permien, d'autres ont lieu à la LPT

Les taux évalués:

- **83% des genres**
- **96% de espèces**

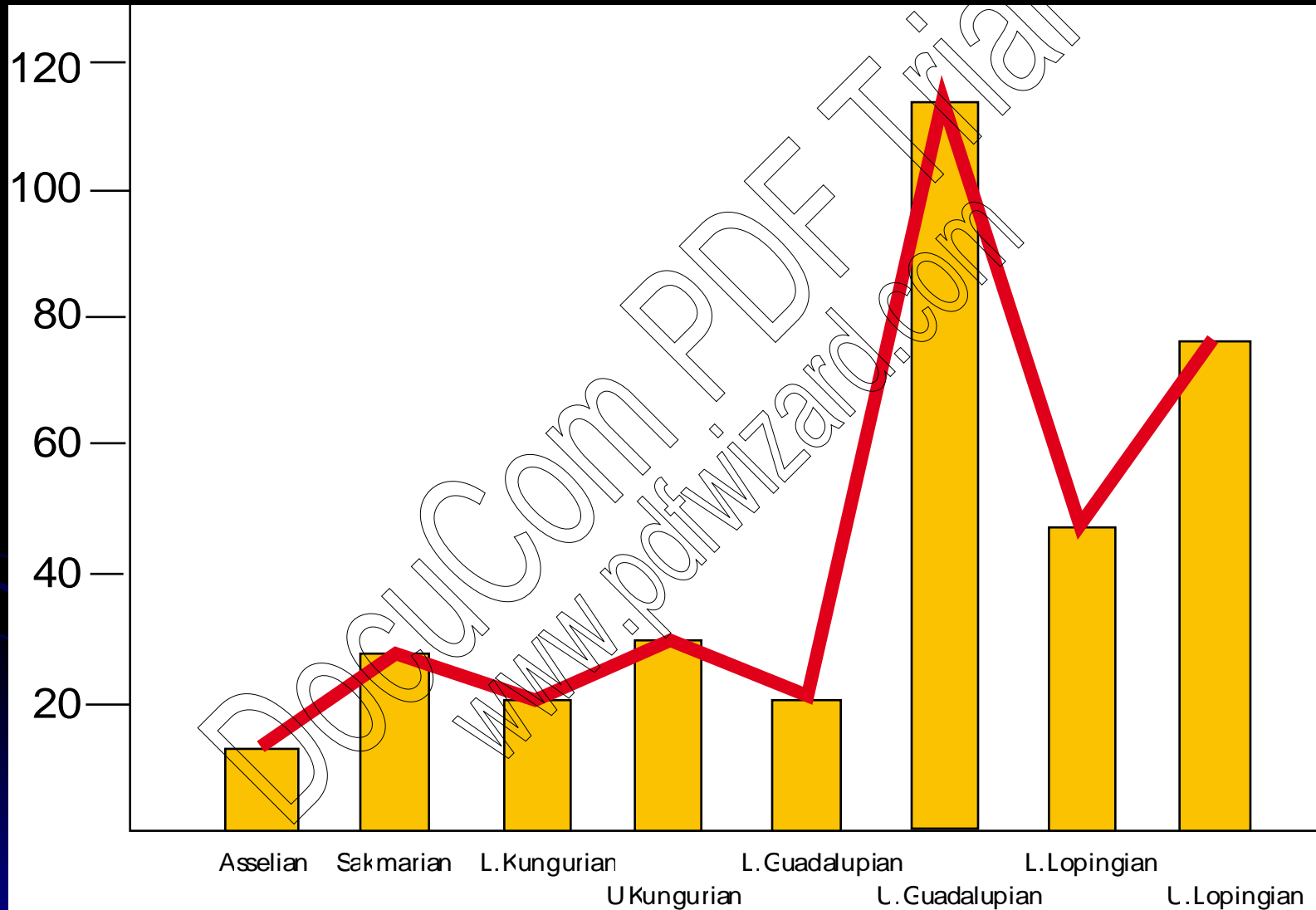


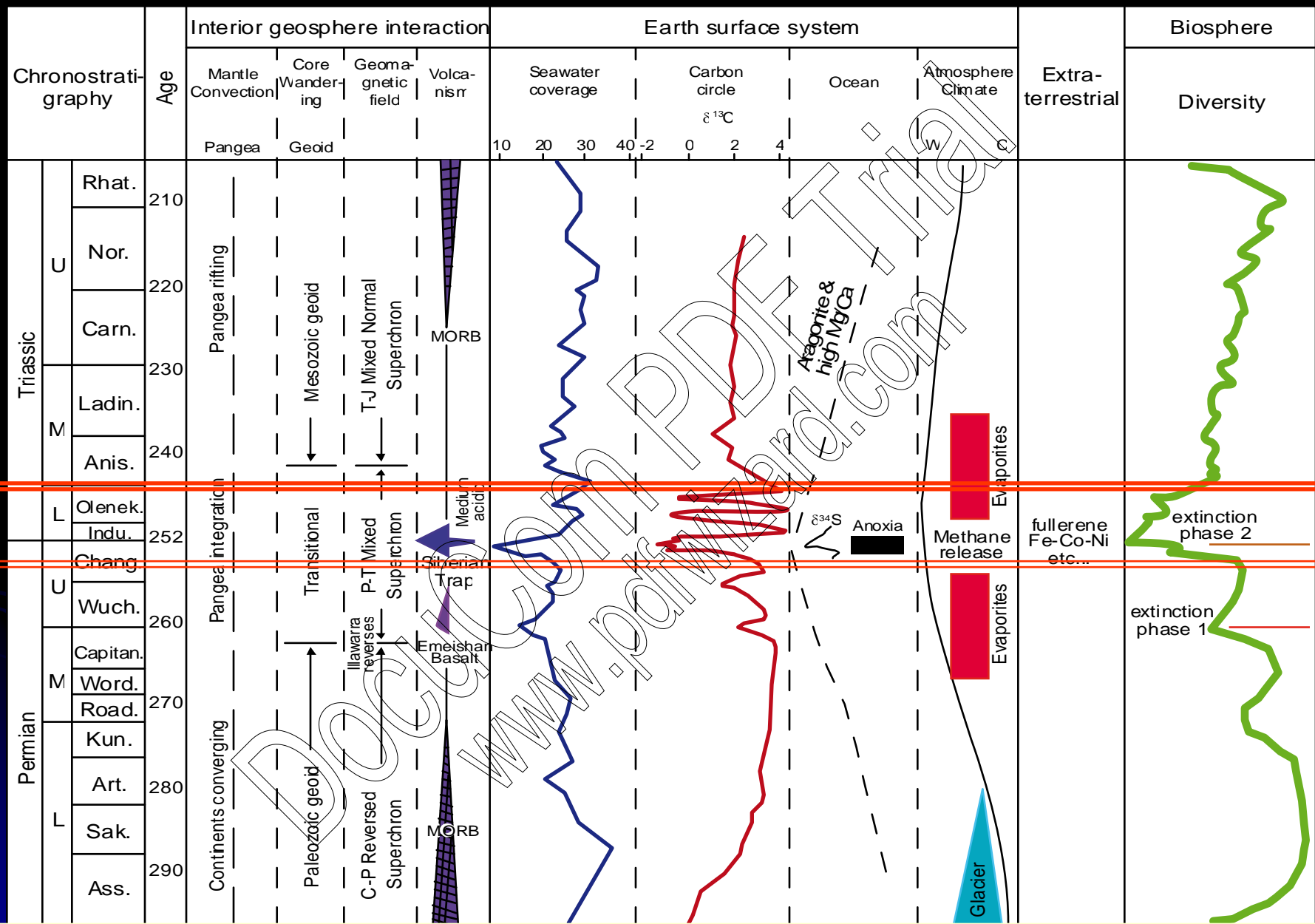


Guadalupien-Lopingien = Permien moyen-Permien supérieur Yin et al. 2007

Nombre d'extinction de familles marines

Yugan et al. 1994

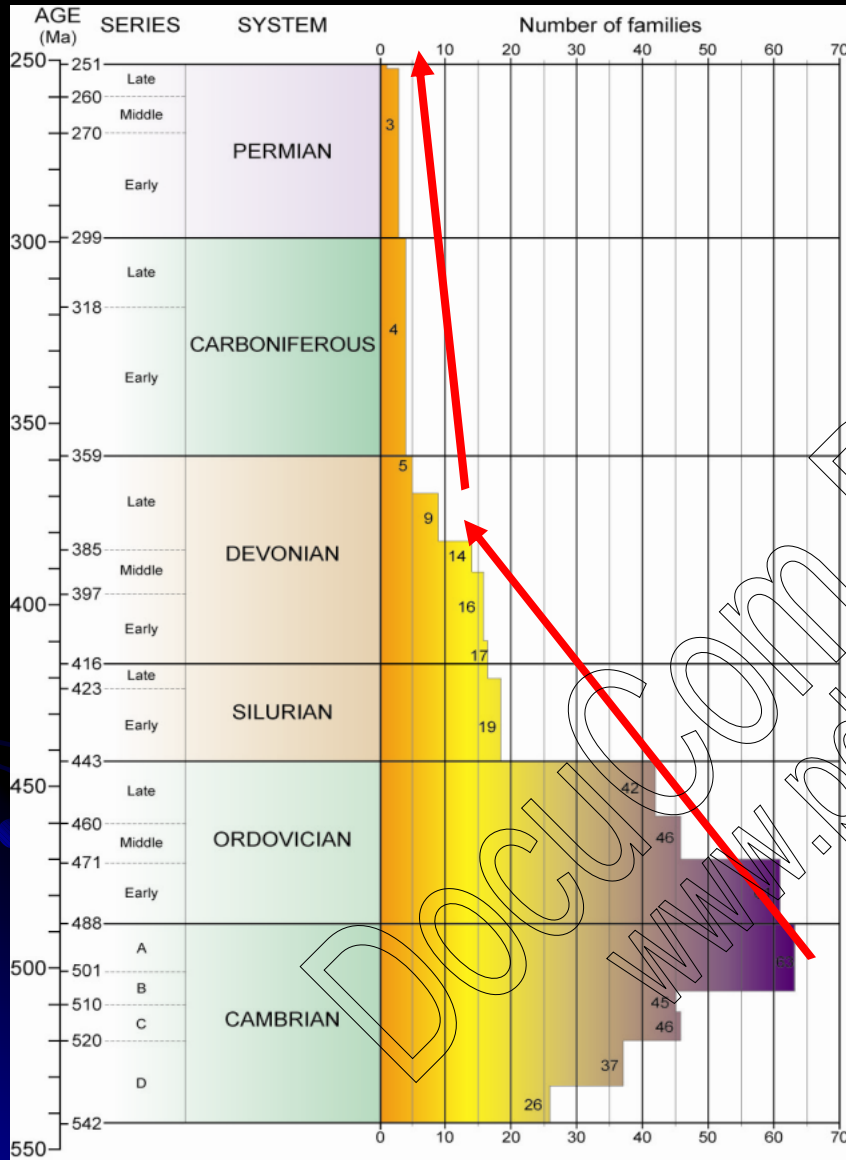




Des groupes disparaissent complètement à la limite P/T



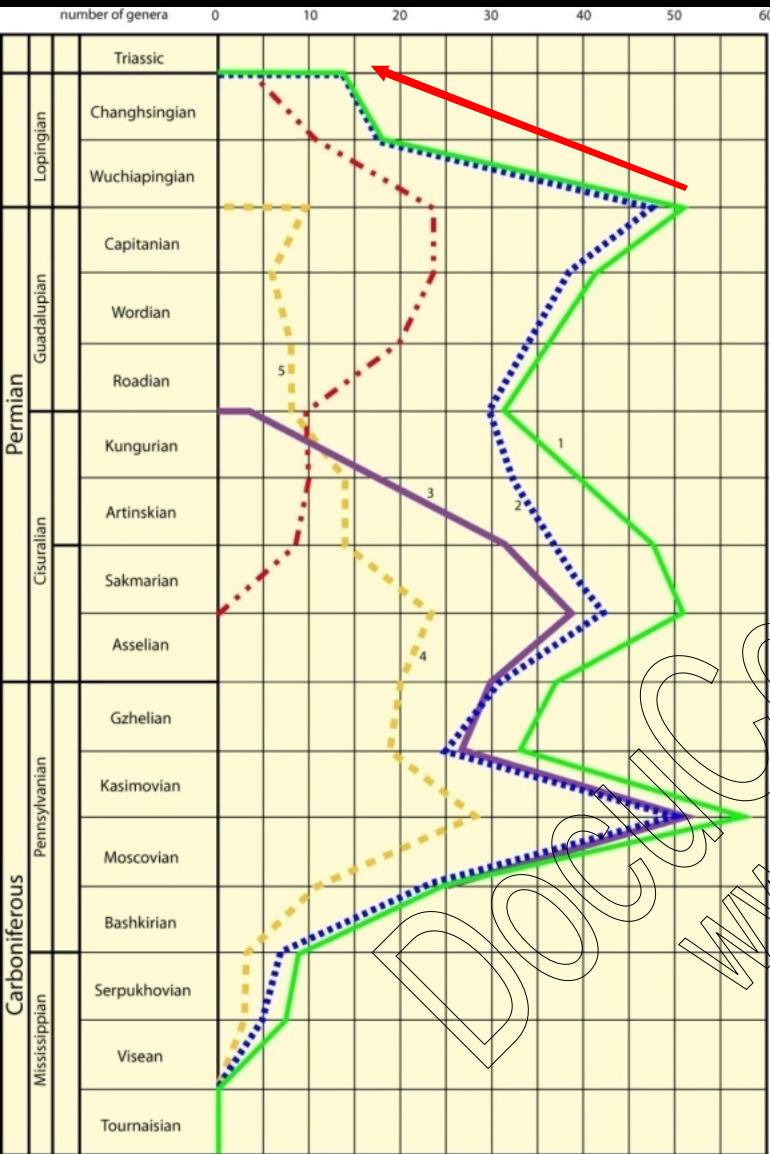
Trilobites



Extinction graduelle

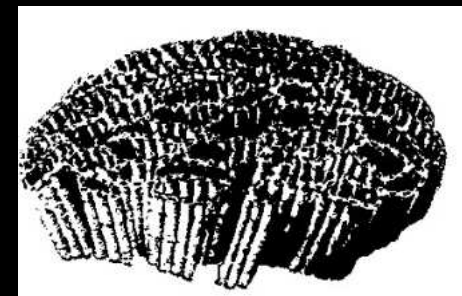
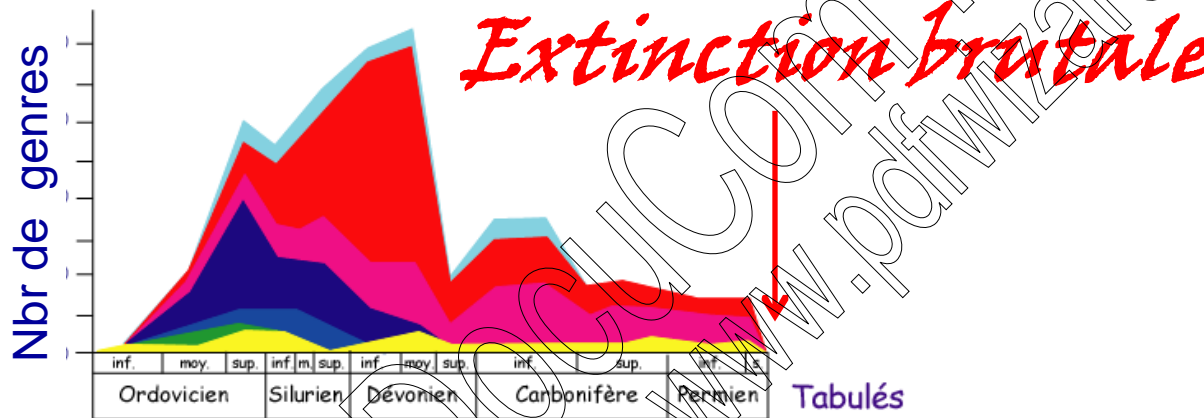
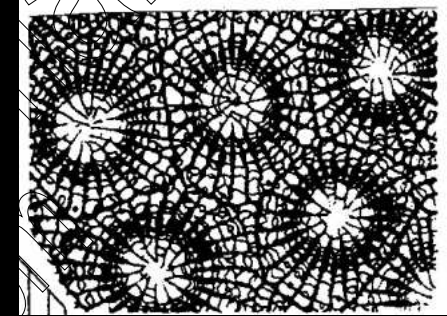
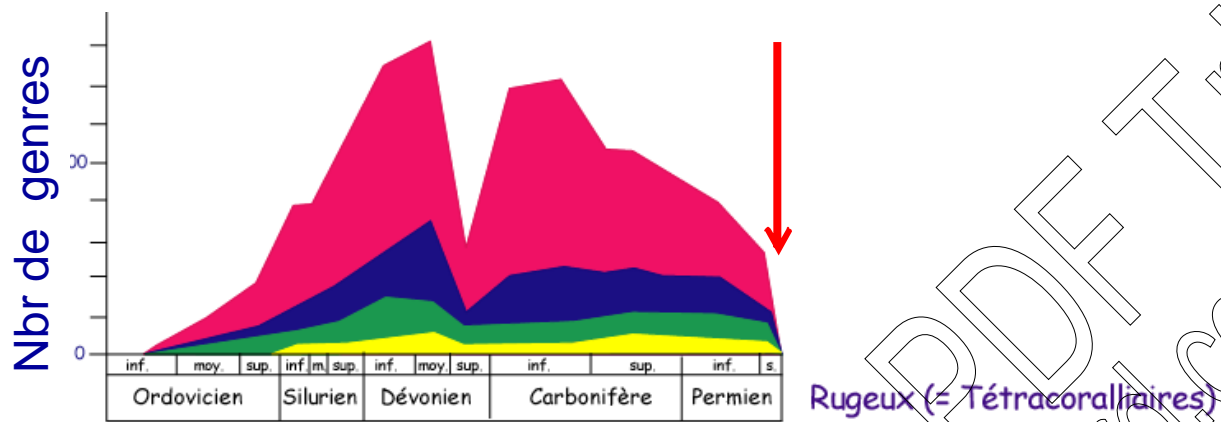
Fusulines

(grands foraminifères benthiques)



Extinction graduelle

Coraux: Rugeux et Tabulés



Le milieu récifal disparaît complètement des mers durant tout le Trias inférieur. Il est remplacé durant cette période par des constructions microbiennes.

Microbialites

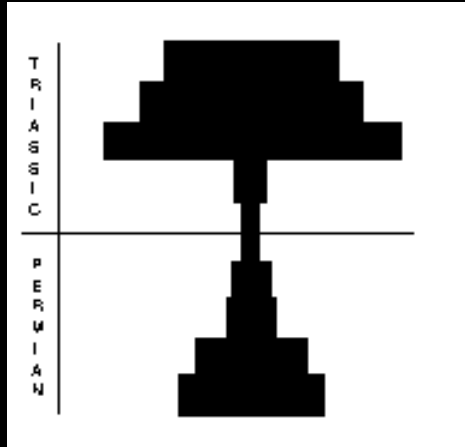


Encroûtements microbiens, formant tapis (*mat*)

Des groupes sont atteints par l'extinction mais sans disparaître



Céphalopodes

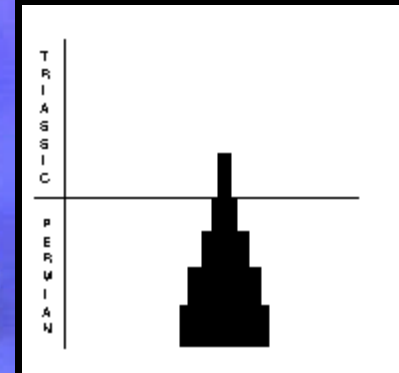


Ammonoïdes

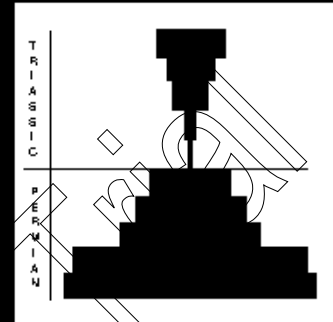
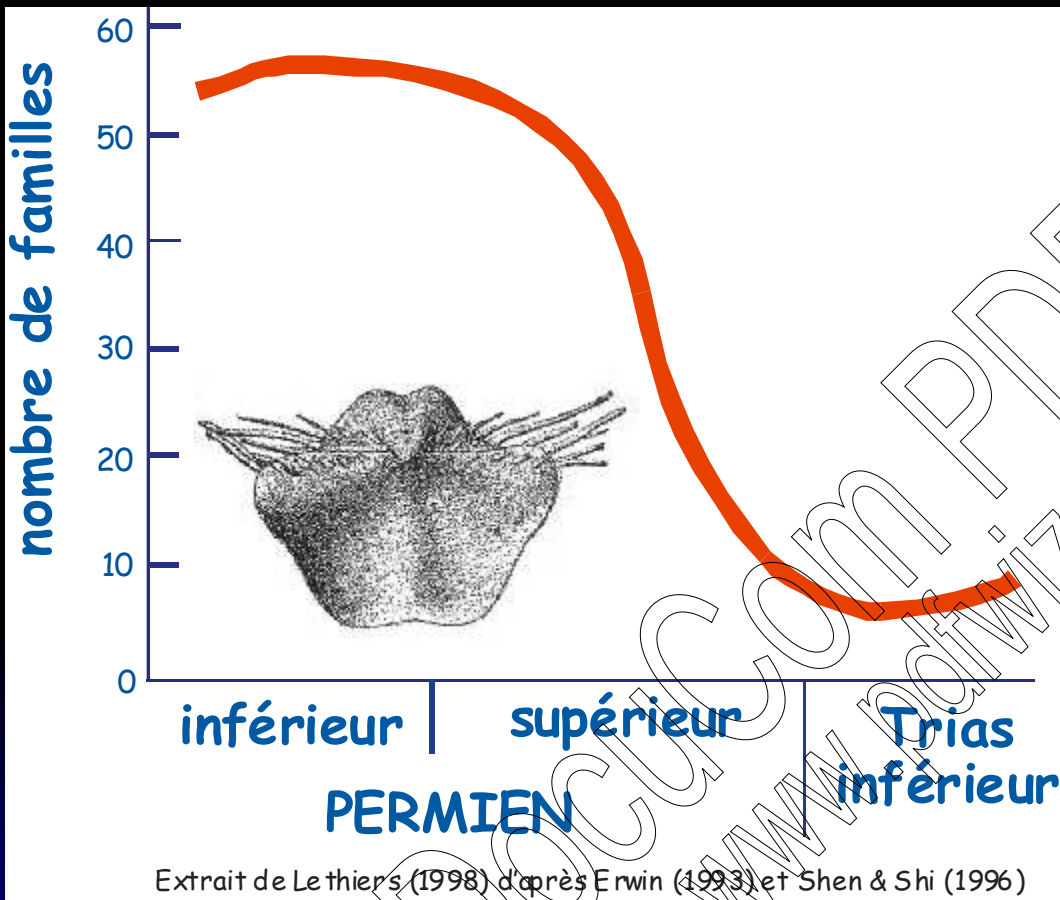


Goniatites
déclinent durant
tout le Permien et
disparaissent à la
LPT

Orthocératidés
disparaissent au
cours du Trias



Brachiopodes



Très diversifiés et abondants durant tout le Paléozoïque supérieur. Durant le Permien supérieur et le Trias inférieur, ce groupe perd 50 familles, i.e. 90% des genres

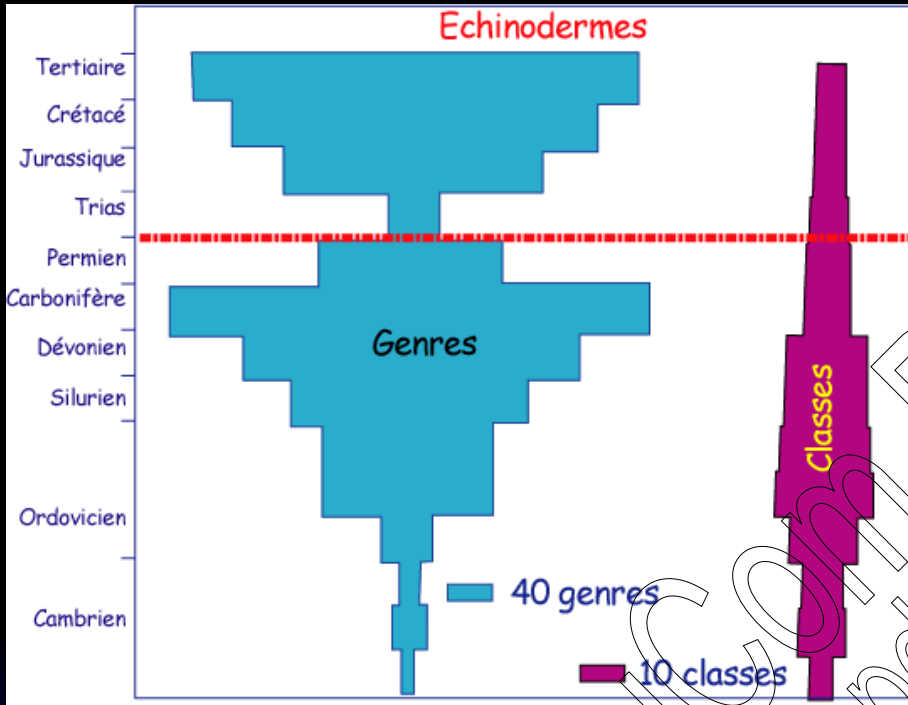
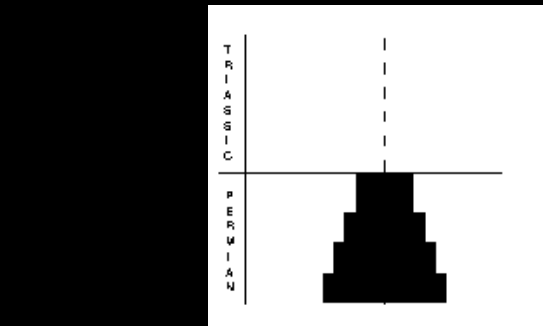
Orthida, articulated



Echinodermes

Crinoïdes

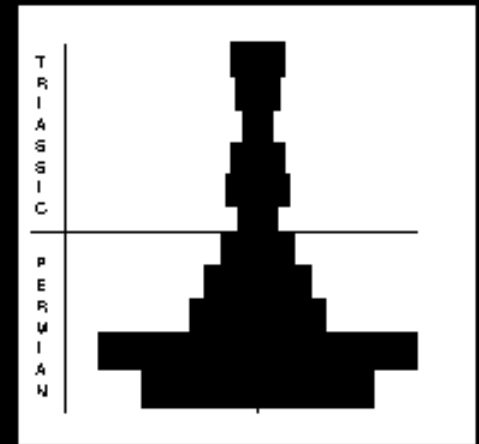
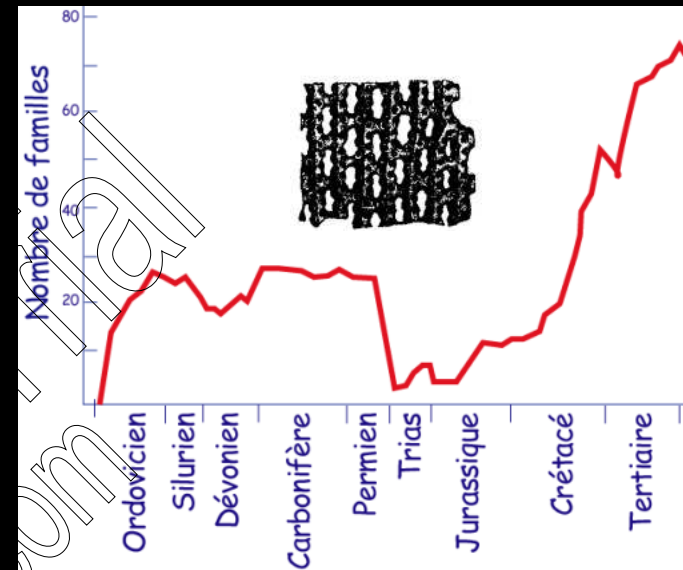
42 familles disparaissent. Un seul genre survit au Trias.



Parmi les echinoïdes, seul le genre *Miocidaris* survit et est à l'origine de tous les échinoïdes mésozoïques



Bryozoaires

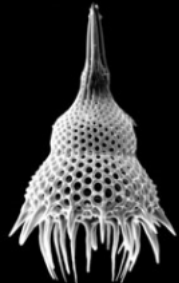
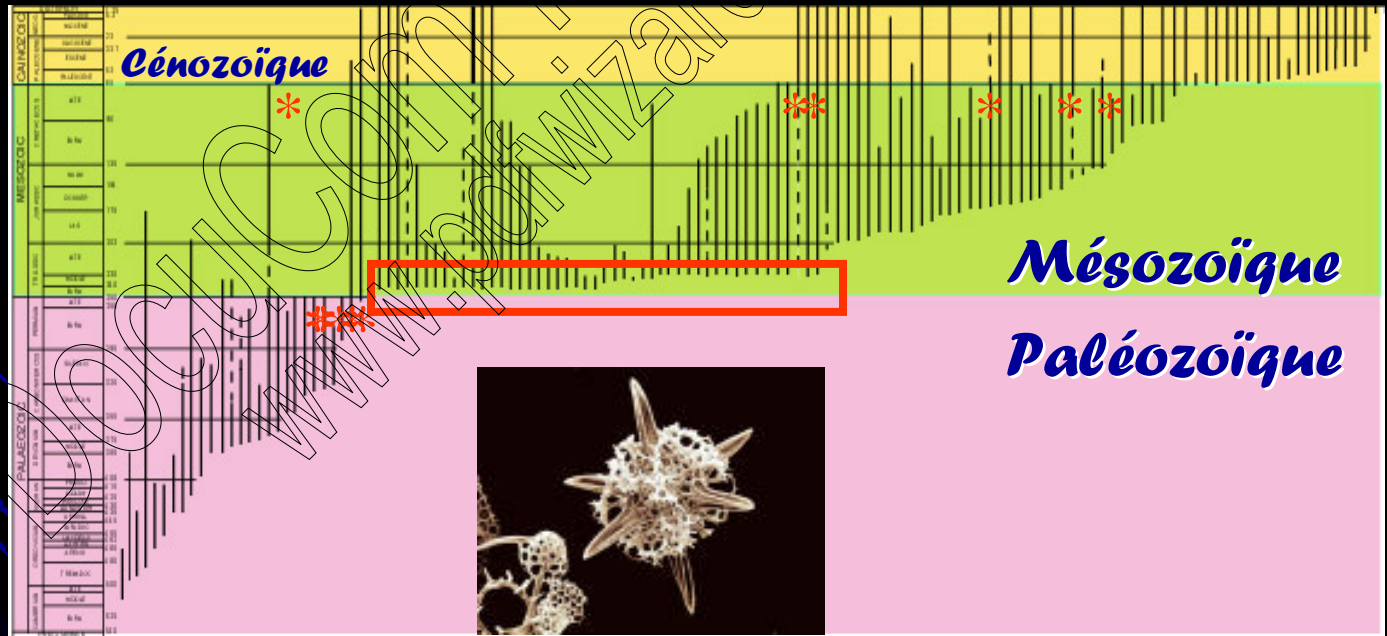


Après un déclin graduel durant le Permien supérieur (75% des familles disparaissent), présentent un minimum de diversité au Trias

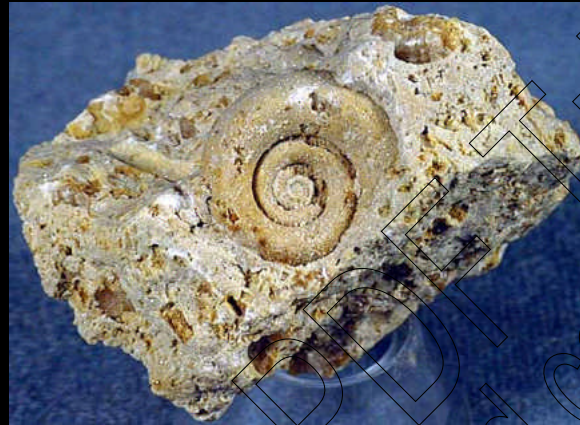
Plancton

Moyennement affecté mais montre une chute de la diversité chez les radiolaires et les acritarches.

* Chez les radiolaires, il y a disparition des faunes au sommet du Permien supérieur et durant le Trias basal (**crise de la silice**) mais la brutalité de l'événement reste à prouver. C'est surtout l'explosion à la fin du Trias inférieur qui est spectaculaire. Il y a un relais entre les faunes paléozoïques et mésozoïques

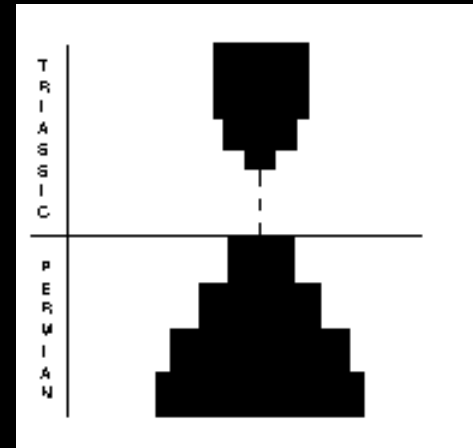


Gastéropodes

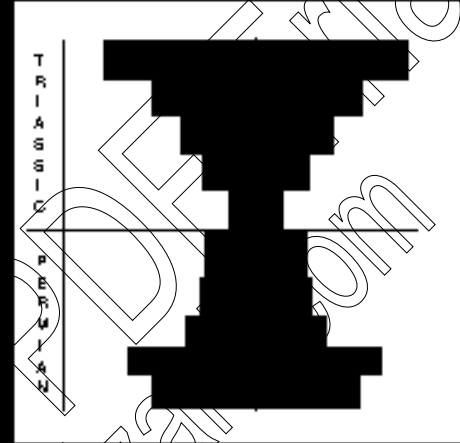
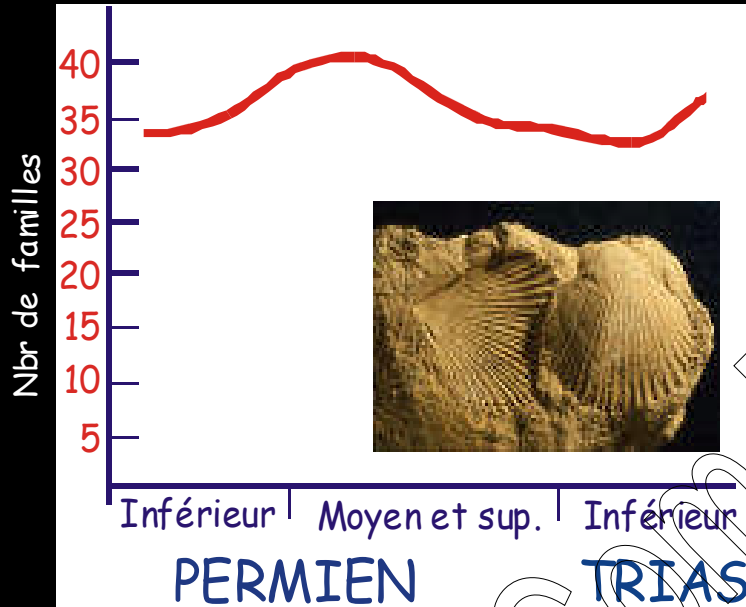


Après un déclin progressif au cours du Permien supérieur, il semblent disparaître à la LPT.

Ils "ressuscitent" au cours du Trias moyen. C'est ce que nomme "l'effet Lazare"

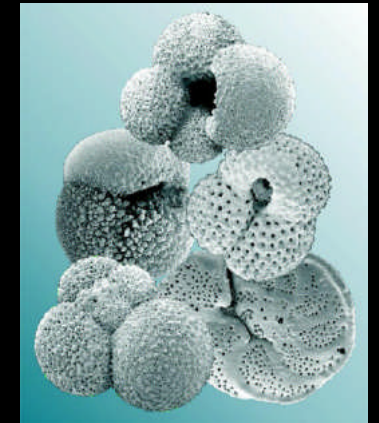
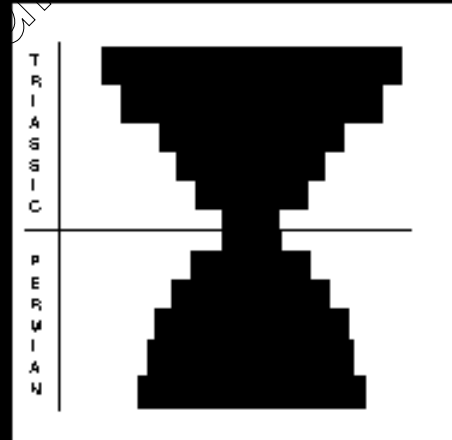


D'autres groupes semblent moins affectés



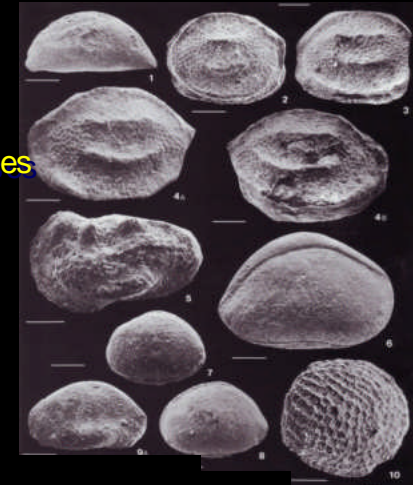
Bivalves

Autres Foraminifères

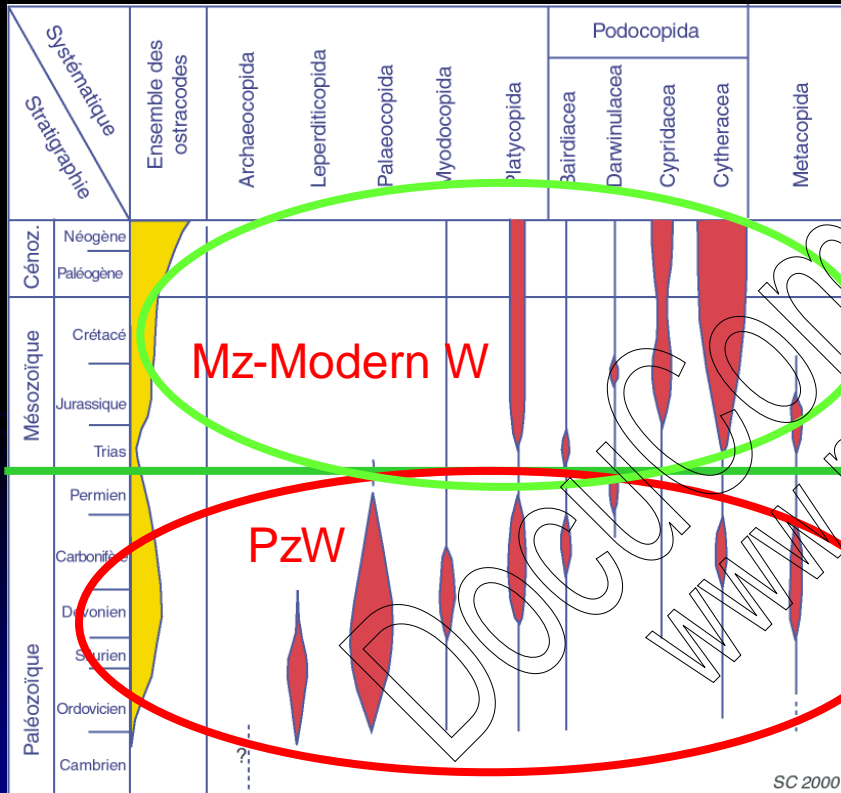


Chez les ostracodes

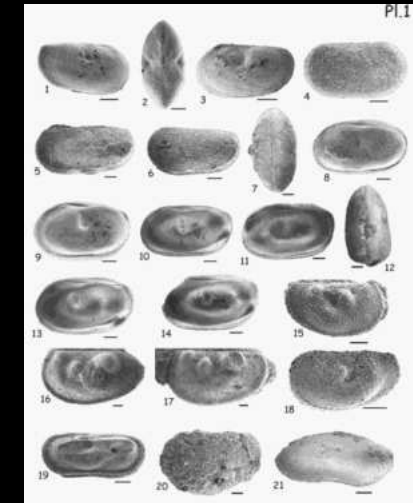
Principaux marqueurs:
Ostracodes ornementés à carapaces épaisses



Late Ladinian Iran, KT



Principaux marqueurs:
Ostracodes à bord dorsal droit

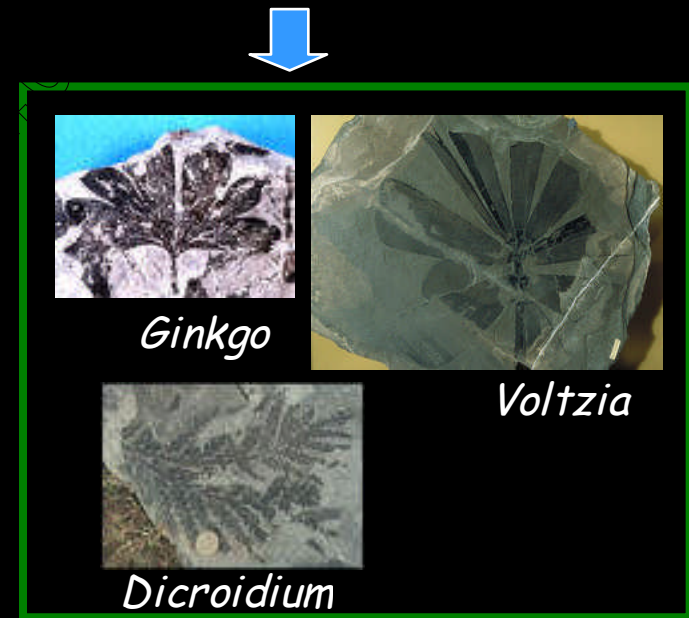
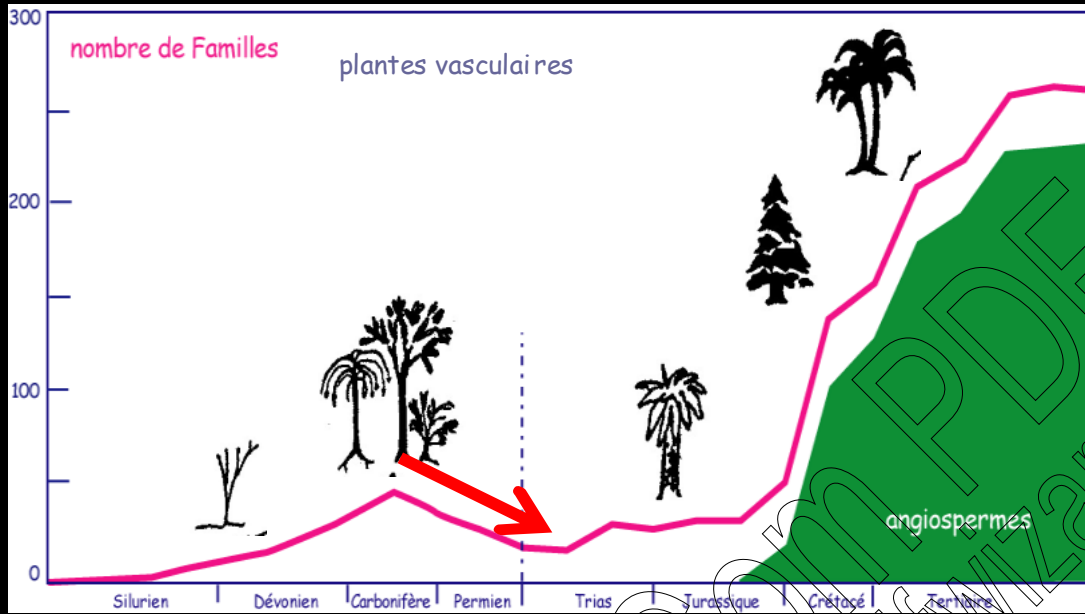


Latest Permian, Tk, CS et al

En milieu continental



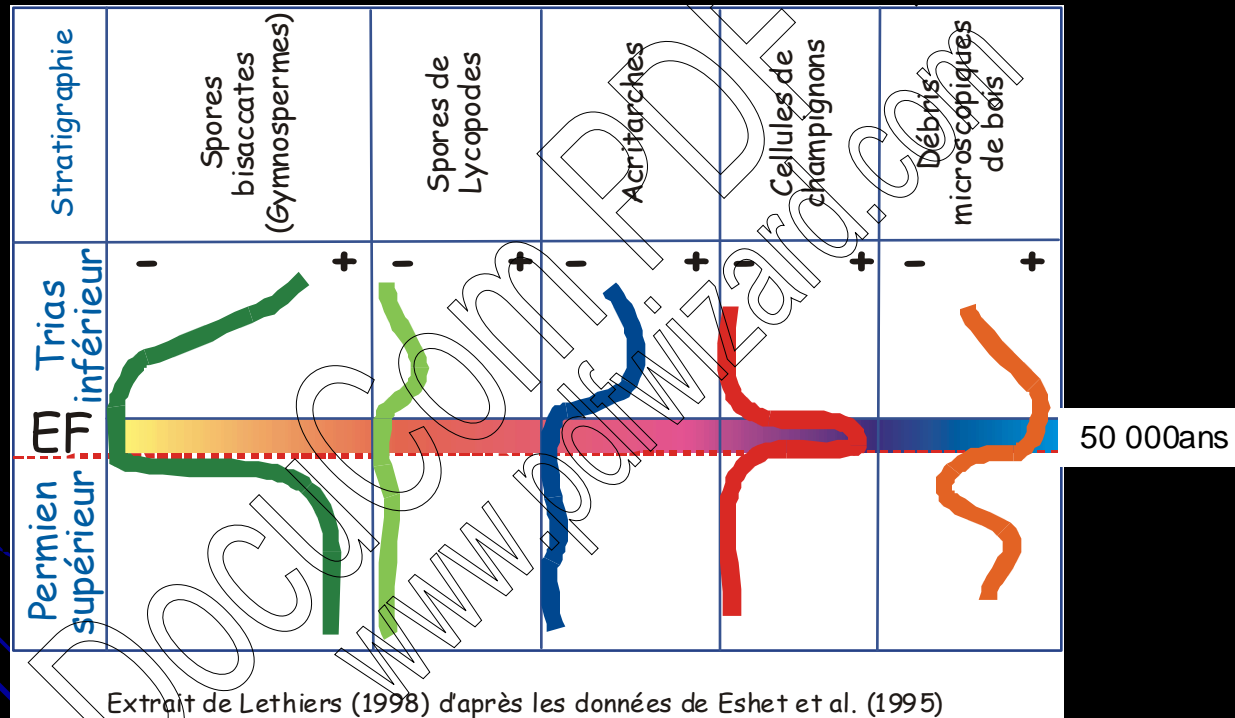
Flore



Les données générales au niveau des familles montrent une réduction graduelle de la flore entre le Carbonifère supérieur et le Trias.

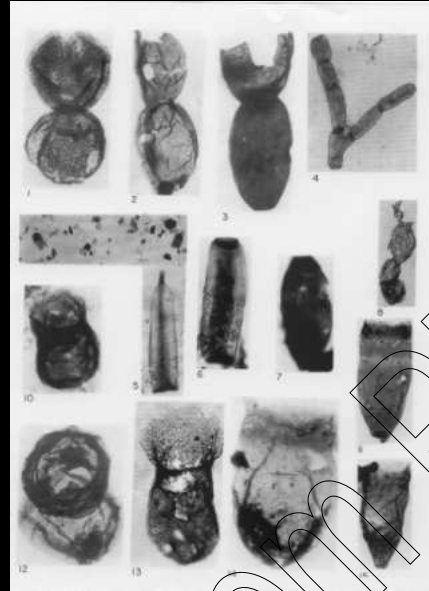
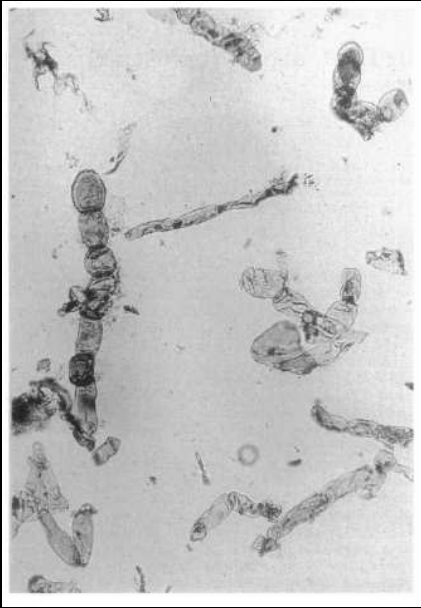
Événement fongique

Niveau fin, reconnu dans de nombreux gisements dans les faciès marins peu profonds;
 Palynofaciès sont constitués à 95% de restes de champignons.

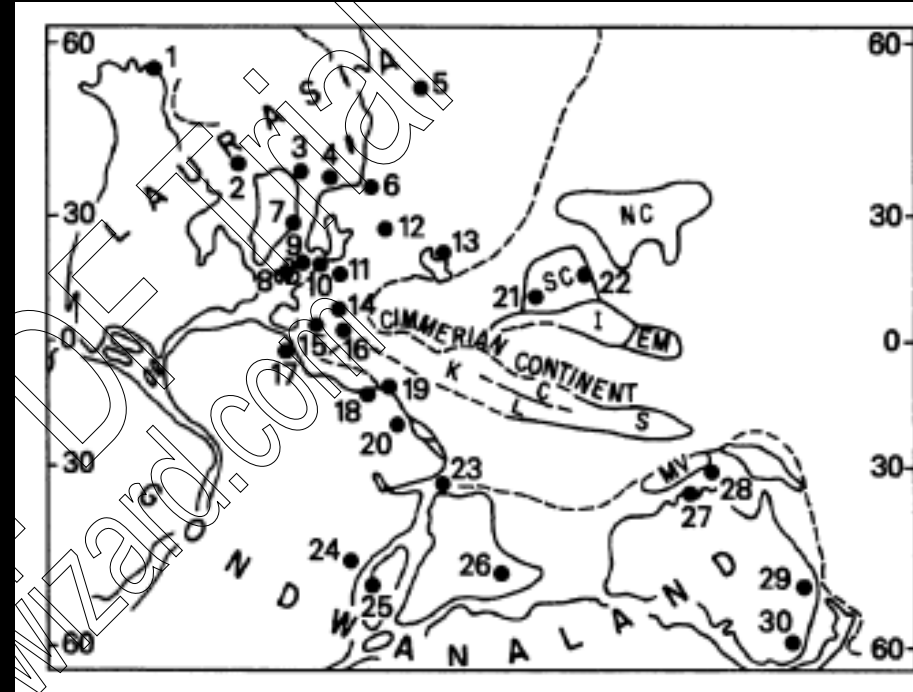


Destruction des plantes terrestres autotrophes, produisant d'abondants débris de matière organique propices au développement des saprophytes, tels les champignons, répondant rapidement au stress environnemental.

Evénement fongique



Cellules en chaînes et spores
du genre *Tympanicysta*

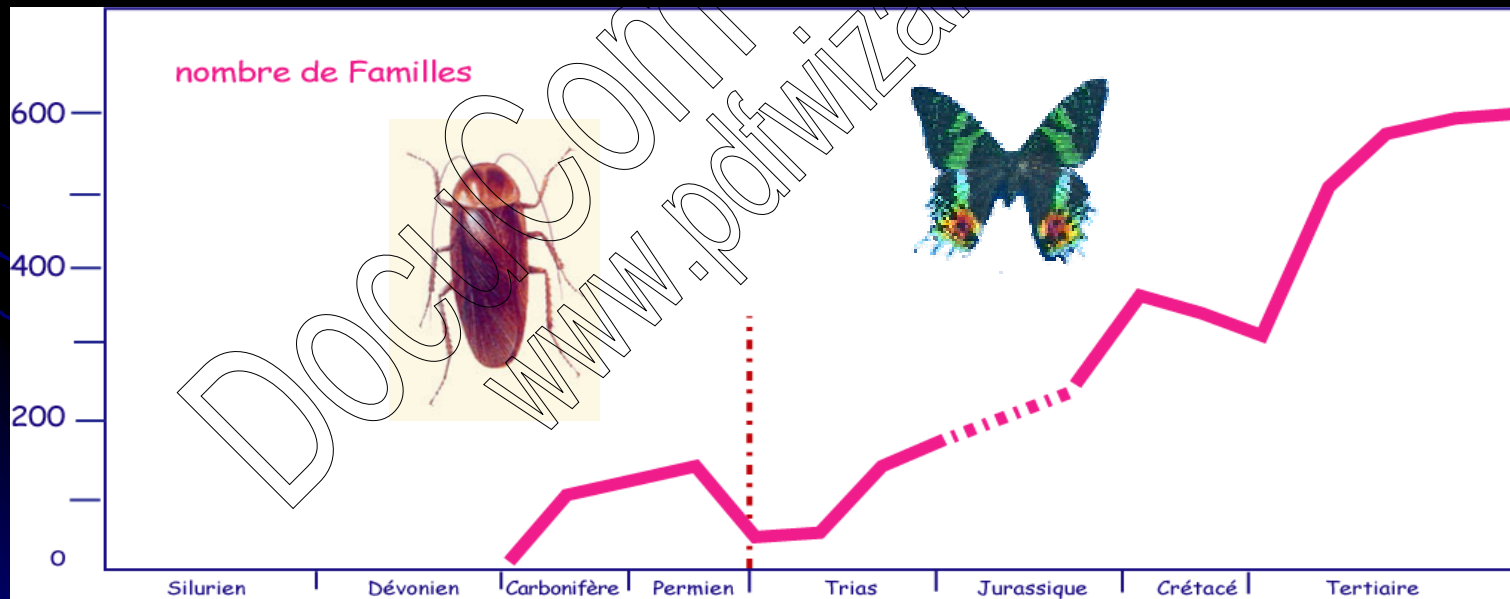


Visscher et al. 1996

L'événement fongique milite en faveur d'une cause catastrophique, très brève.

Insectes

Les insectes atteignent un pic de diversité au Permien moyen, puis le nombre de familles chute d'environ 63% au Trias inférieur. Les insectes sont donc significativement affectés par la crise. C'est la seule extinction en masse chez cette super-classe.

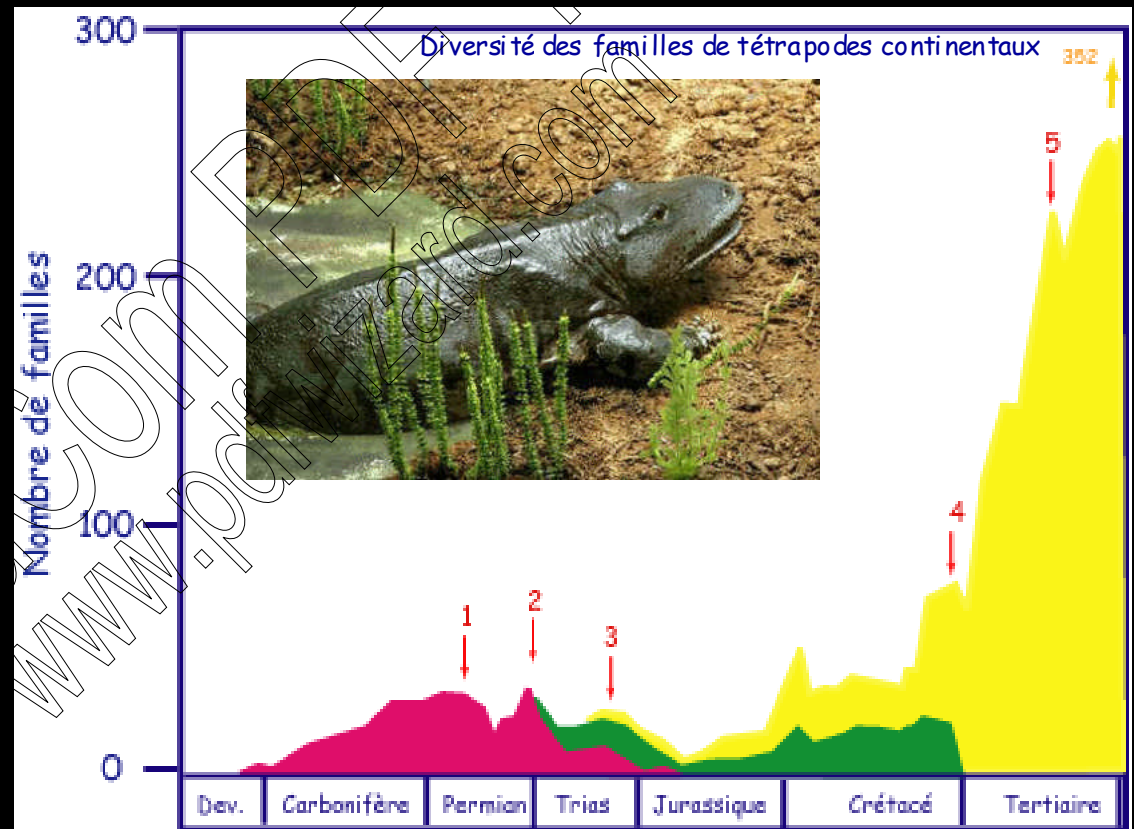
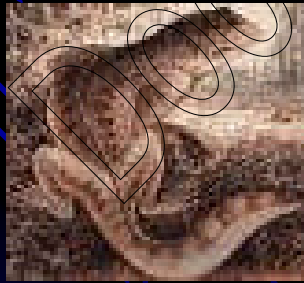


Vertébrés

70 à 77% familles de vertébrés disparaissent MAIS les épisodes de baisse de biodiversité se situent au Permien inférieur et au Trias basal



Les petits vertébrés sont moins affectés. Les reptiles d'eau douce ne sont pas touchés et se diversifient.





- Données très mal contraintes.
- Enregistrements lacunaires
- Datations délicates

Sud Oural
1995

Conclusion sur les données

L'extinction en masse de la limite P/T est **nette et intense**, surtout en domaine marin.
Des arguments en faveur d'**extinctions graduelles** dans le Permien supérieur et le Trias inférieur s'accumulent.
Mais d'autres indices évoquent un **épisode catastrophique**.

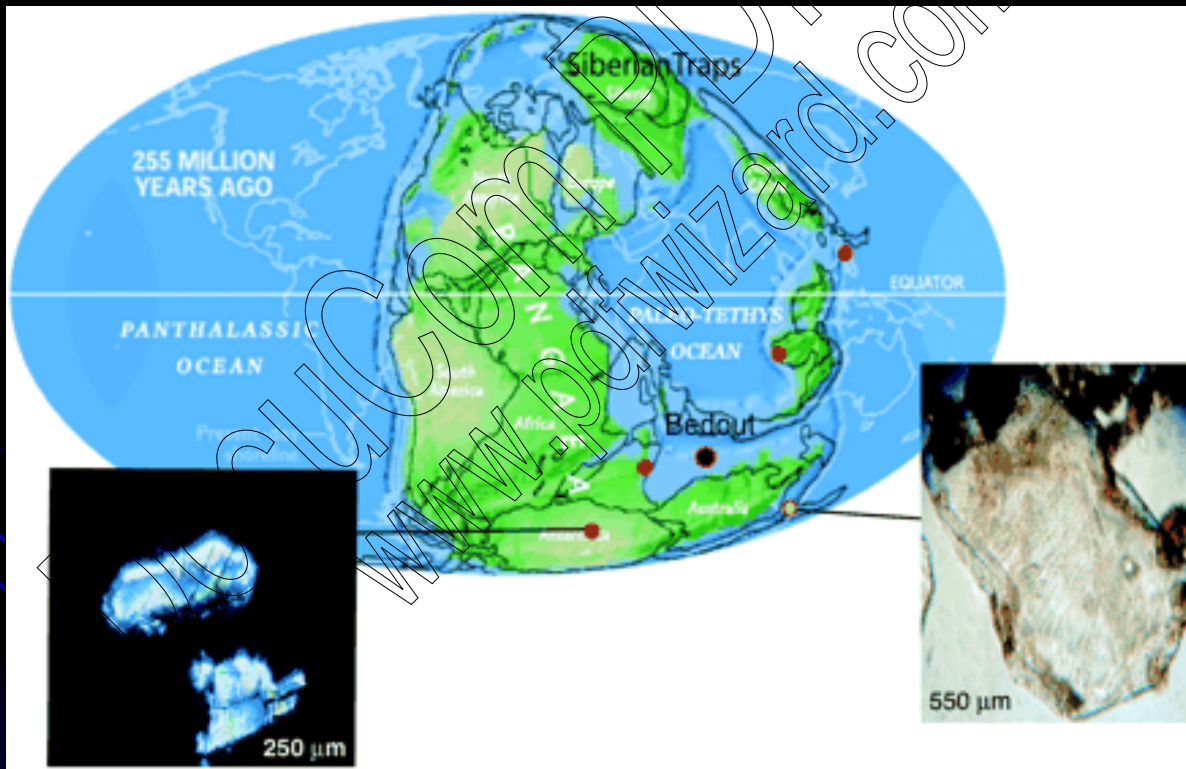
Quels sont les événements globaux susceptibles d'avoir causé l'extinction biologique??



©KarenCarr

Les événements globaux à la limite Permien -Trias

Il n'y a pas de trace d'impact prouvée



Les événements globaux à la limite Permien -Trias

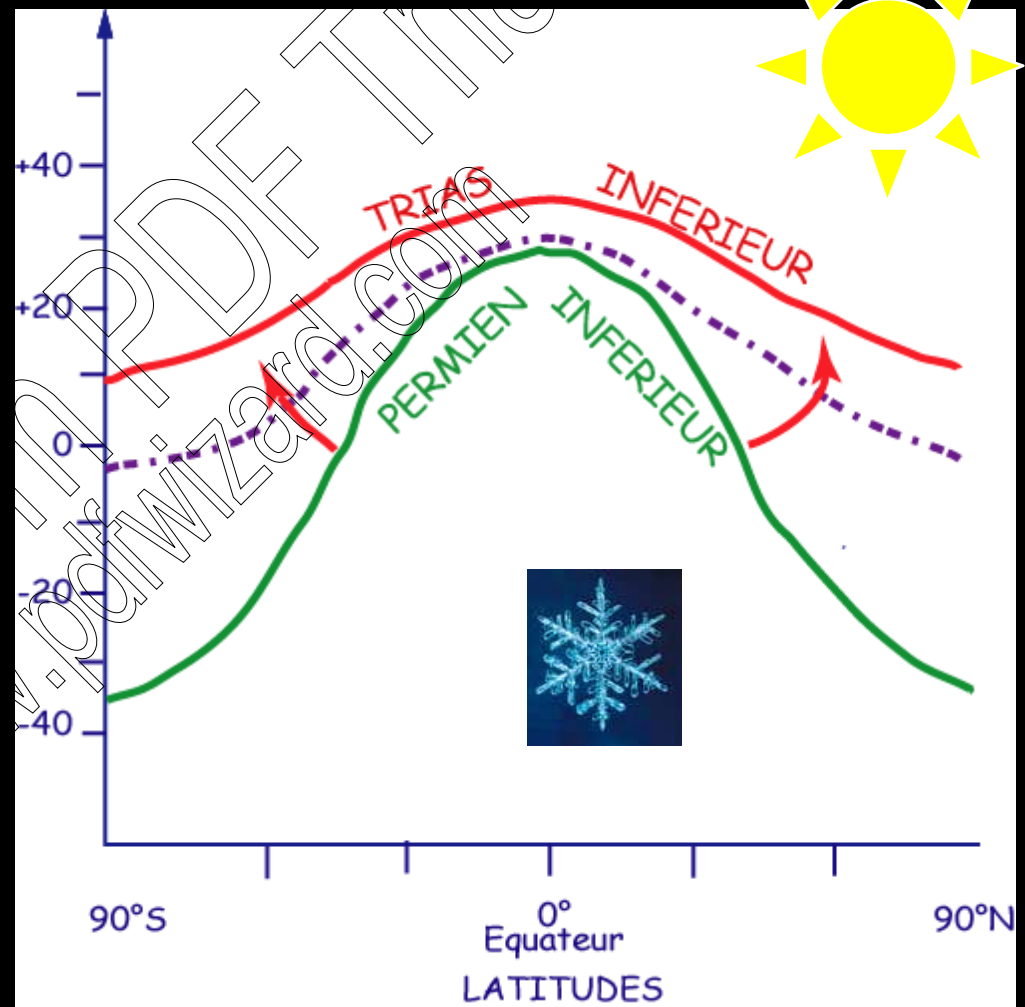
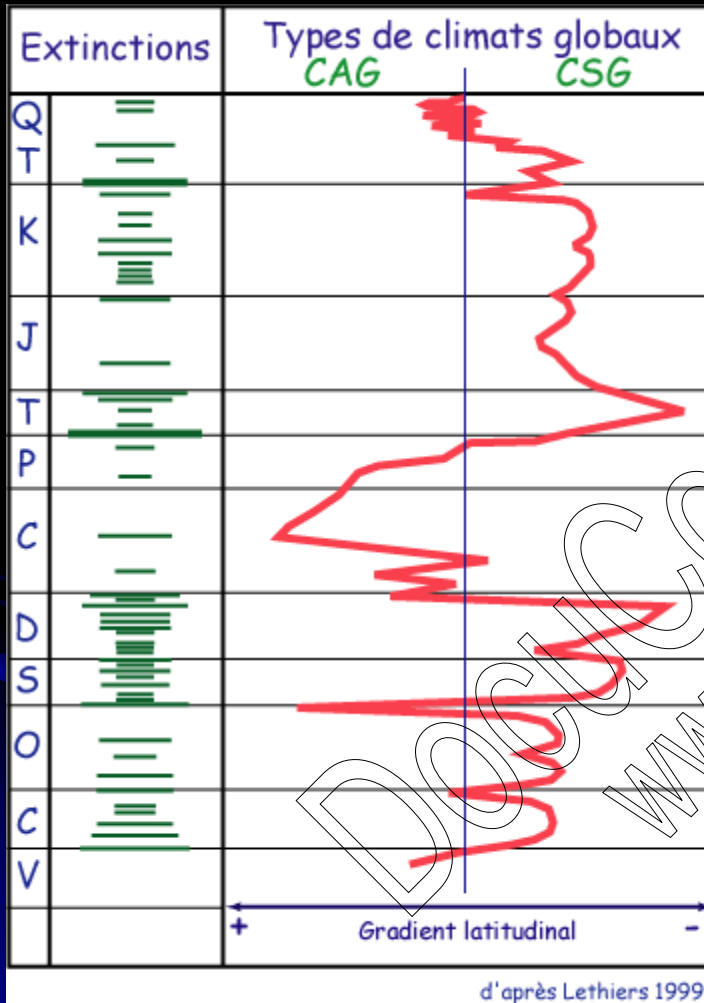
Il n'y a pas de trace d'impact prouvée

✓ Changement climatique global



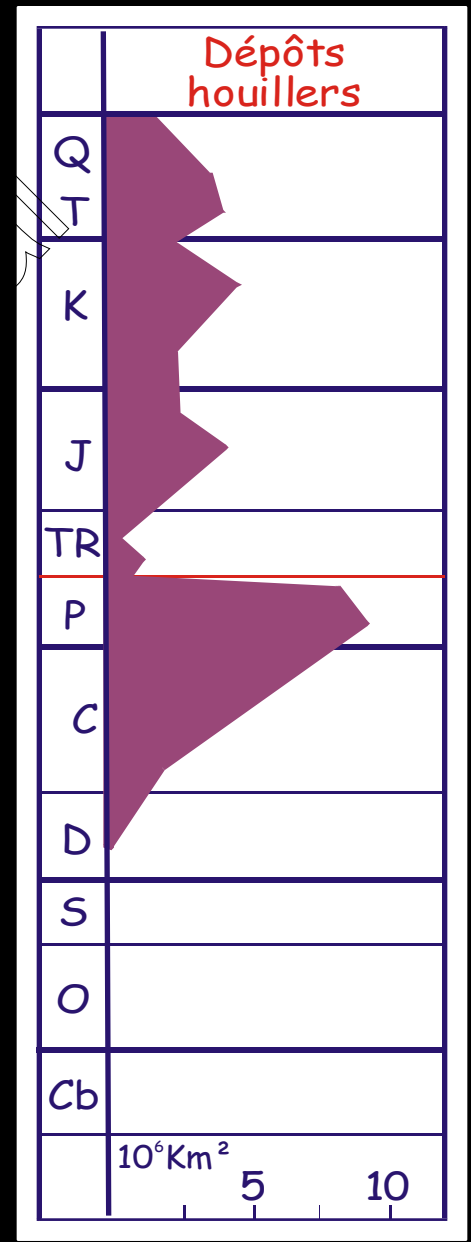
Un changement climatique global

CAG  **CSG**

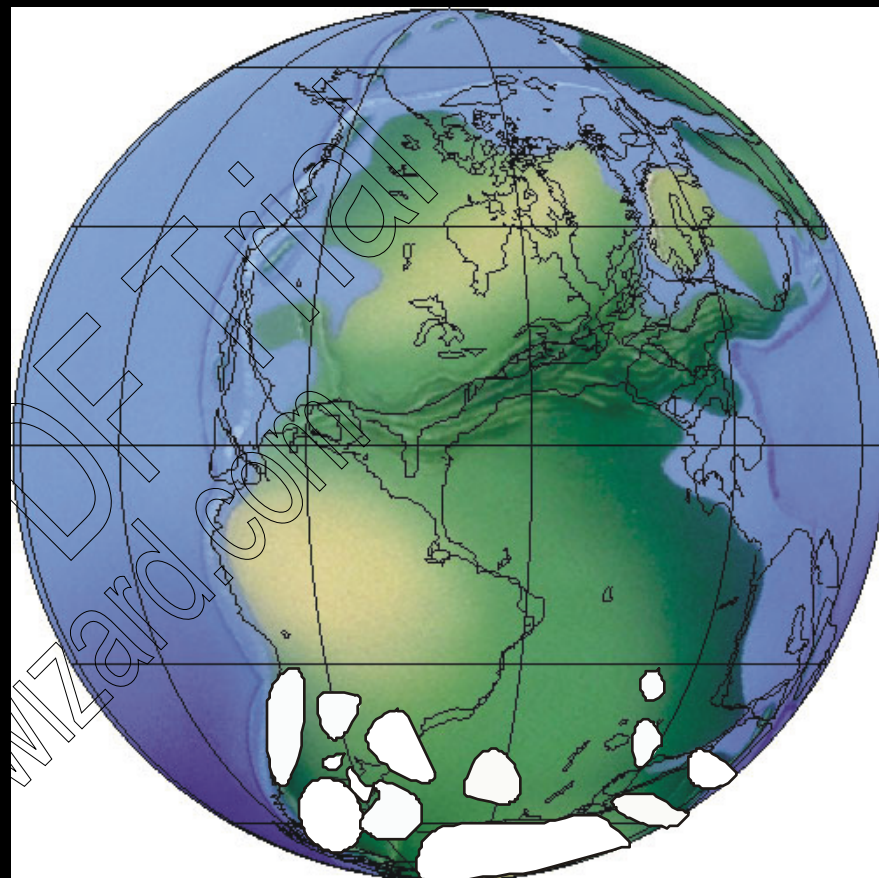


Données de faciès:

Dans l'hémisphère Nord les argillites et charbons du Carbonifère supérieur – Permien inférieur sont remplacés par les **séries détritiques rouges** de type semi-aride



Au sud du Gondwana, une grande glaciation est à son maximum au Carbonifère supérieur. Au Permien inférieur, la glaciation persiste sous forme de calottes plus modestes et associées à des glaciers d'altitudes. Des dernières traces de glaciation subsistent jusqu'à 7Ma avant la fin du Permien en Australie.



La disparition des glaciers modifie complètement le système de circulation océanique en supprimant les eaux froides de fond au Trias, avec disparition de la psychrosphère.

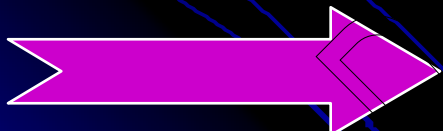
Les causes du changement climatique:

Outre les variations orbitales de la terre qui constituent probablement la cause principale de si grands bouleversements climatiques, trois évènements géologiques vont appuyer ces tendances.

- o Élévation du taux de CO₂ atmosphérique



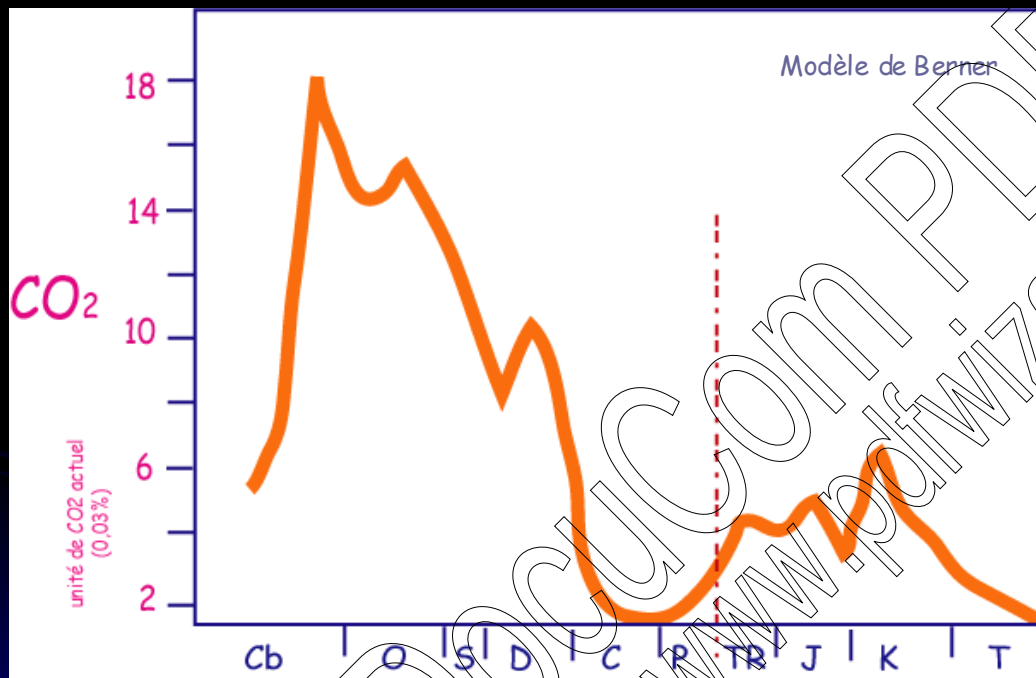
- o Dérive des continents et formation finale de la Pangée



La variation climatique au passage Permien –Trias provoque un changement complet des conditions paléoécologiques des biotopes sur environ 10Ma



Élévation du taux de CO₂



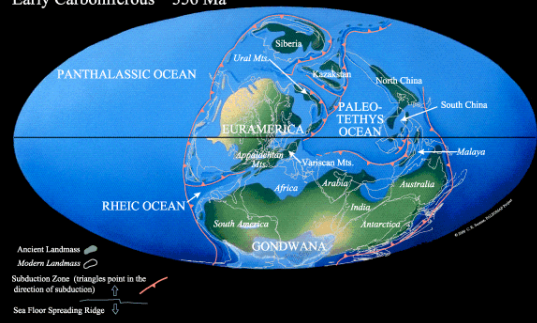
Le CO₂ provient en partie d'une oxydation généralisée des dépôts carbonés. La régression généralisée du Permien supérieur et la surélévation autour de la Pangée accélèrent la remobilisation des dépôts. Ceci est favorisé par le régime de mégamoussons.

Une autre part du CO₂ provient du volcanisme.

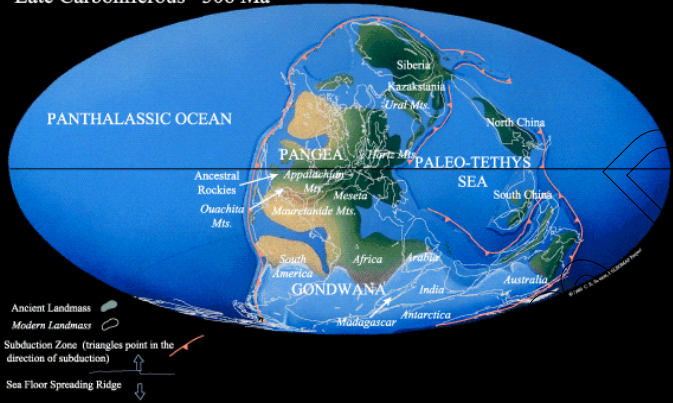
→ Effet de serre



La dérive des continents et la formation finale de la Pangée

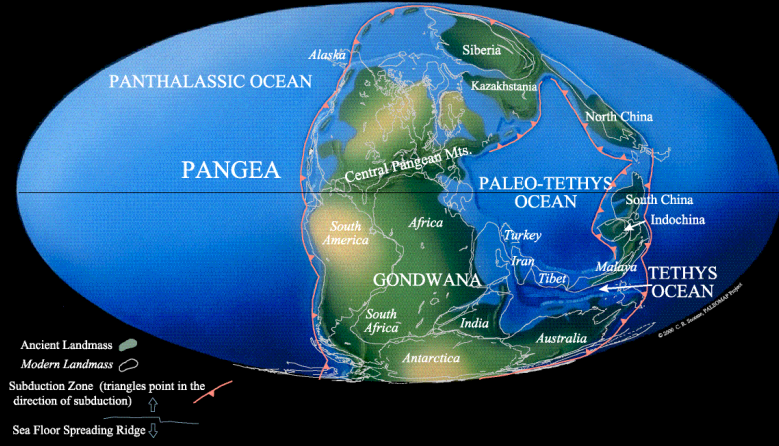


Late Carboniferous 306 Ma



La fin de la formation de la Pangée donne un super-continent, dont la surface est accrue par la grande régression. Cette continentalisation entraîne la dégradation climatique par suppression de l'effet tampon des océans. Des températures élevées, des alternances saisonnières marquées et des tempêtes fortes marquent le climat de la fin du Permien.

Late Permian 255 Ma



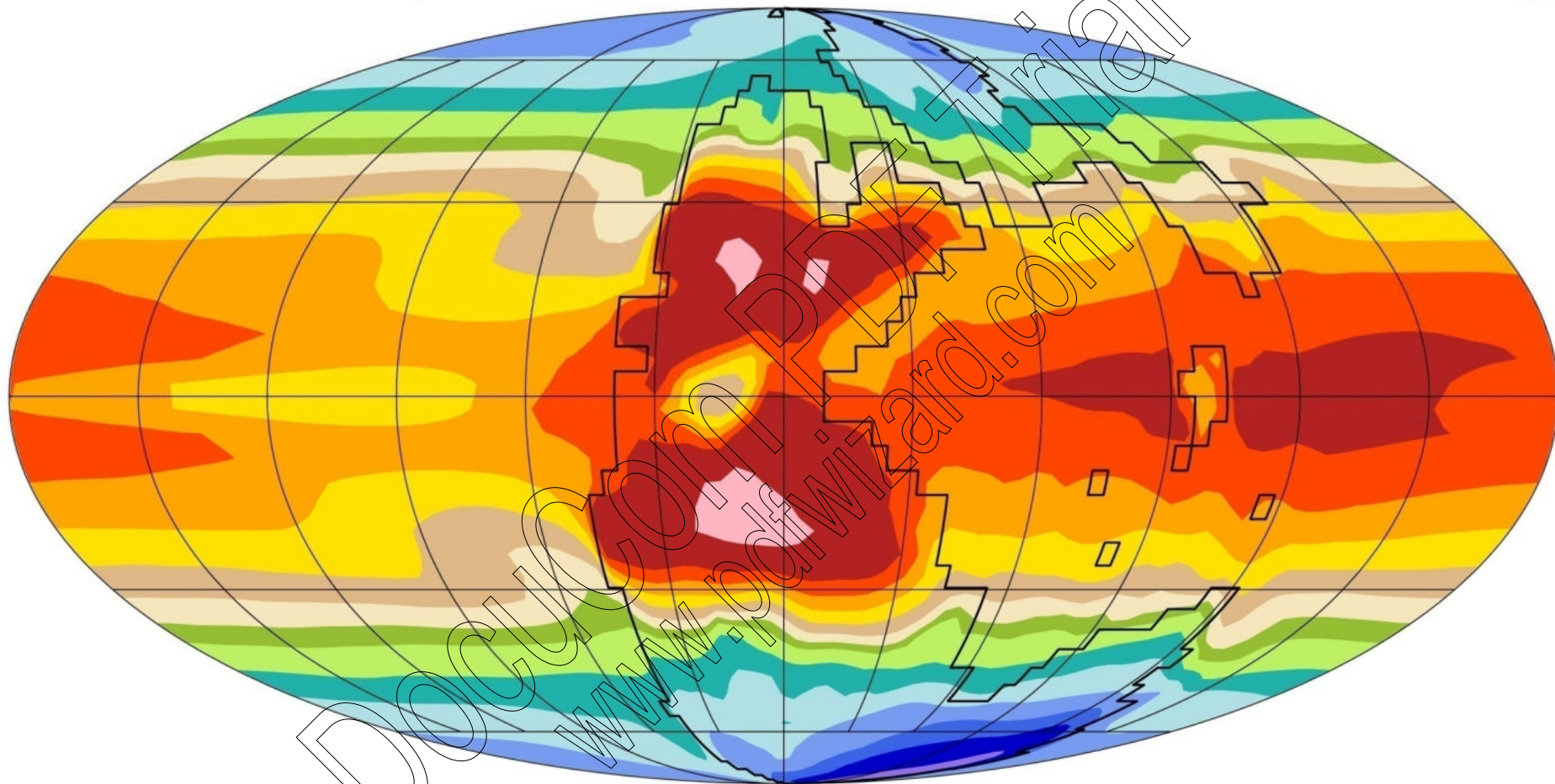
La Pangée migre vers le Nord de 15° de latitude du Permien au Trias. Ce qui va accentuer l'augmentation de température sur une grande partie du super-continent.



Permian (250Ma)

Surface Temperature

°C



Les événements globaux à la limite Permien -Trias

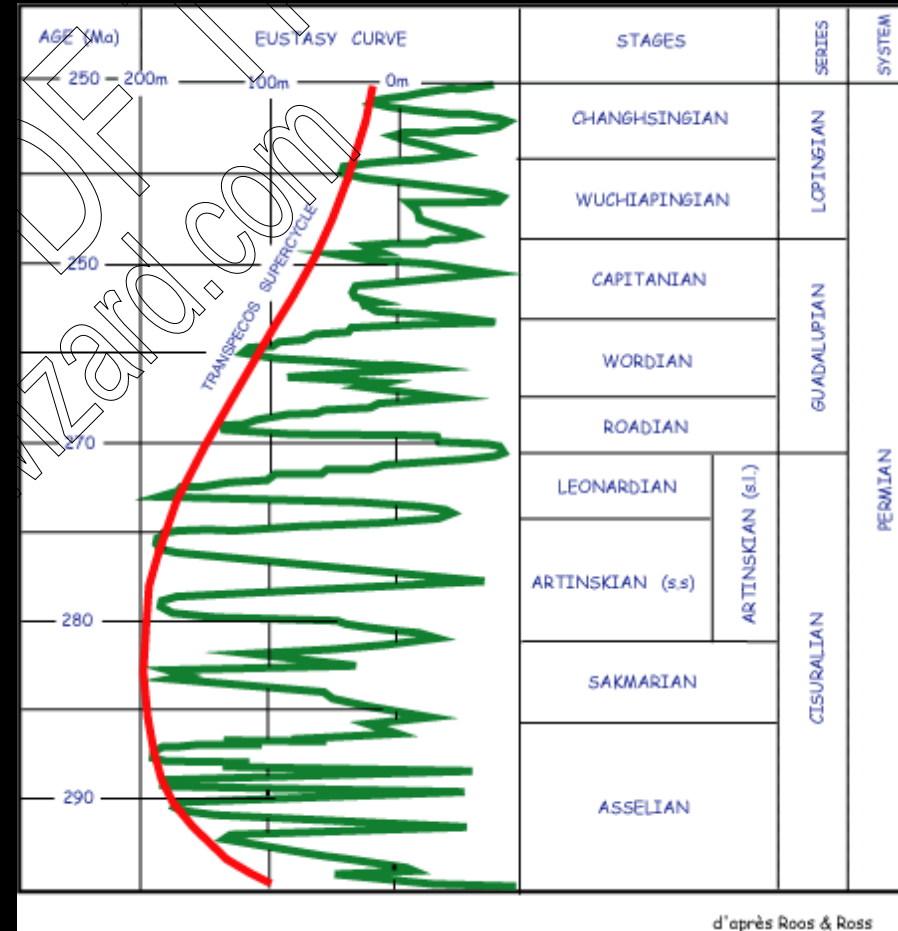
Il n'y a pas de trace d'impact prouvée

- ✓ Changement climatique global
- ✓ Régression à la fin du Permien



La régression majeure du Permien supérieur

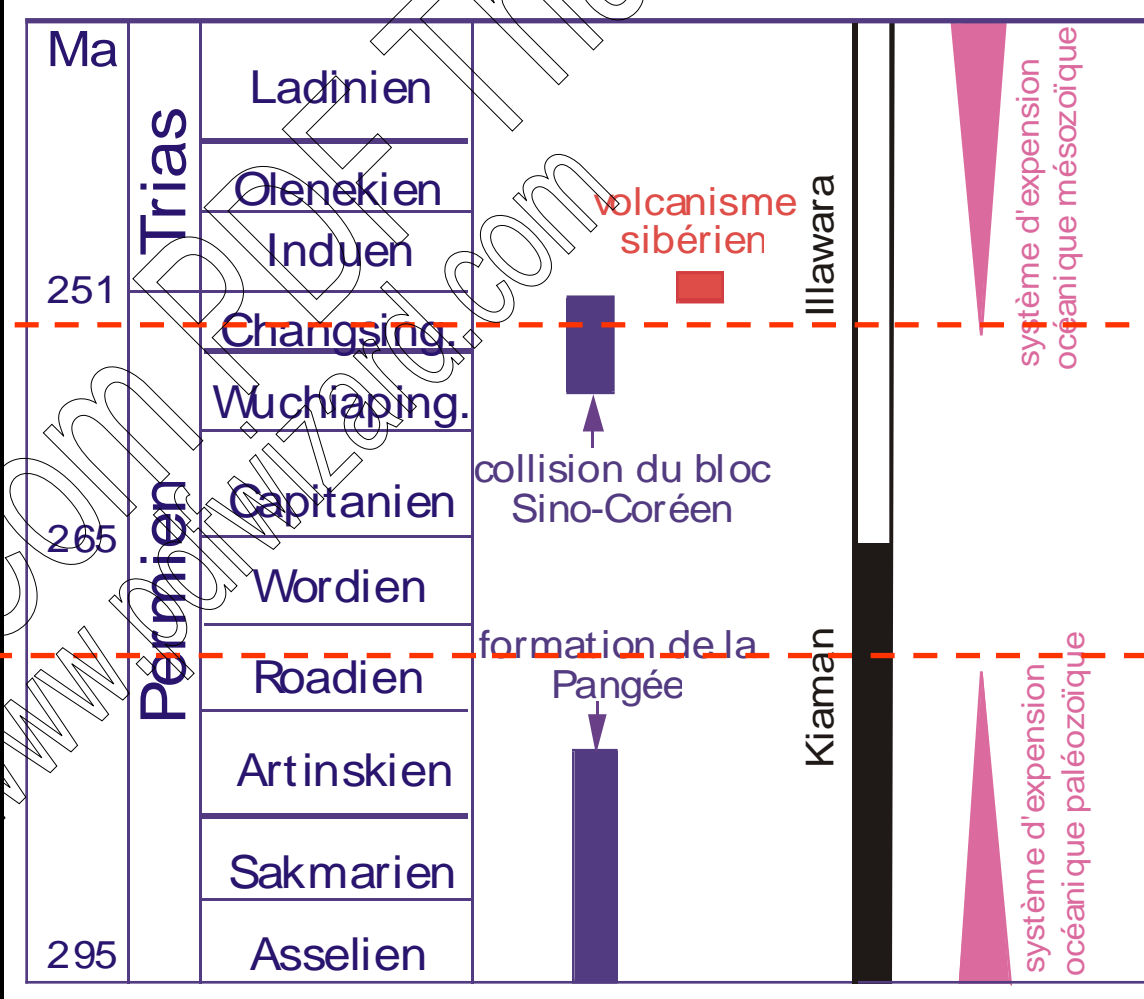
- Au Carbonifère supérieur – Permien inférieur, le niveau eustatique est élevé
- Au Permien supérieur une régression généralisée se produit, avec le niveau le plus bas de tous les temps à la limite P/T. La baisse du niveau marin est estimée à 250m : découvre une partie de l'étage épibathyal.

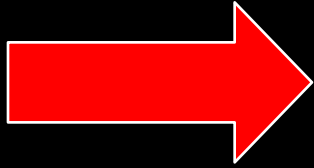


d'après Roos & Ross

La meilleure hypothèse pour expliquer l'origine de cette régression est un arrêt de l'expansion océanique pendant environ 20Ma au cours du Permien

On peut penser que les systèmes d'expansion océanique paléozoïque et mésozoïque sont séparés par une sorte de « temps mort » dans l'activité mantellique. Les calculs géophysiques montrent qu'un arrêt de l'expansion donc de l'activité des dorsales, pendant 10Ma entraîne une augmentation de 6% du volume des bassins océaniques, ce qui suffisant pour expliquer la régression.





Augmentation de la surface des continents: modifications climatiques, érosion et oxydation du carbone, élévation du CO₂
Destruction des biotopes de la plate-forme et donc disparition de nombreux groupes néritiques, chute de la biomasse



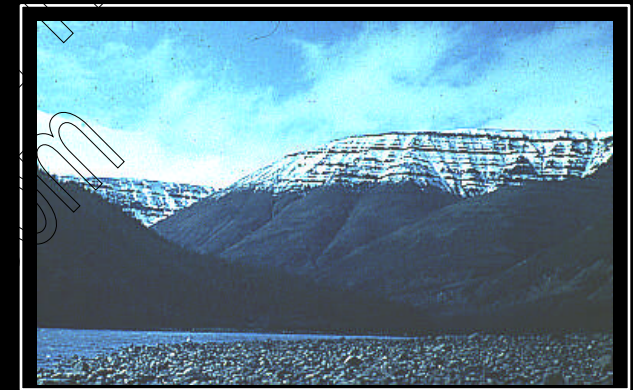
Les événements globaux à la limite Permien -Trias

Il n'y a pas de trace d'impact prouvée

- ✓ Changement climatique global
- ✓ Régression à la fin du Permien
- ✓ Volcanisme

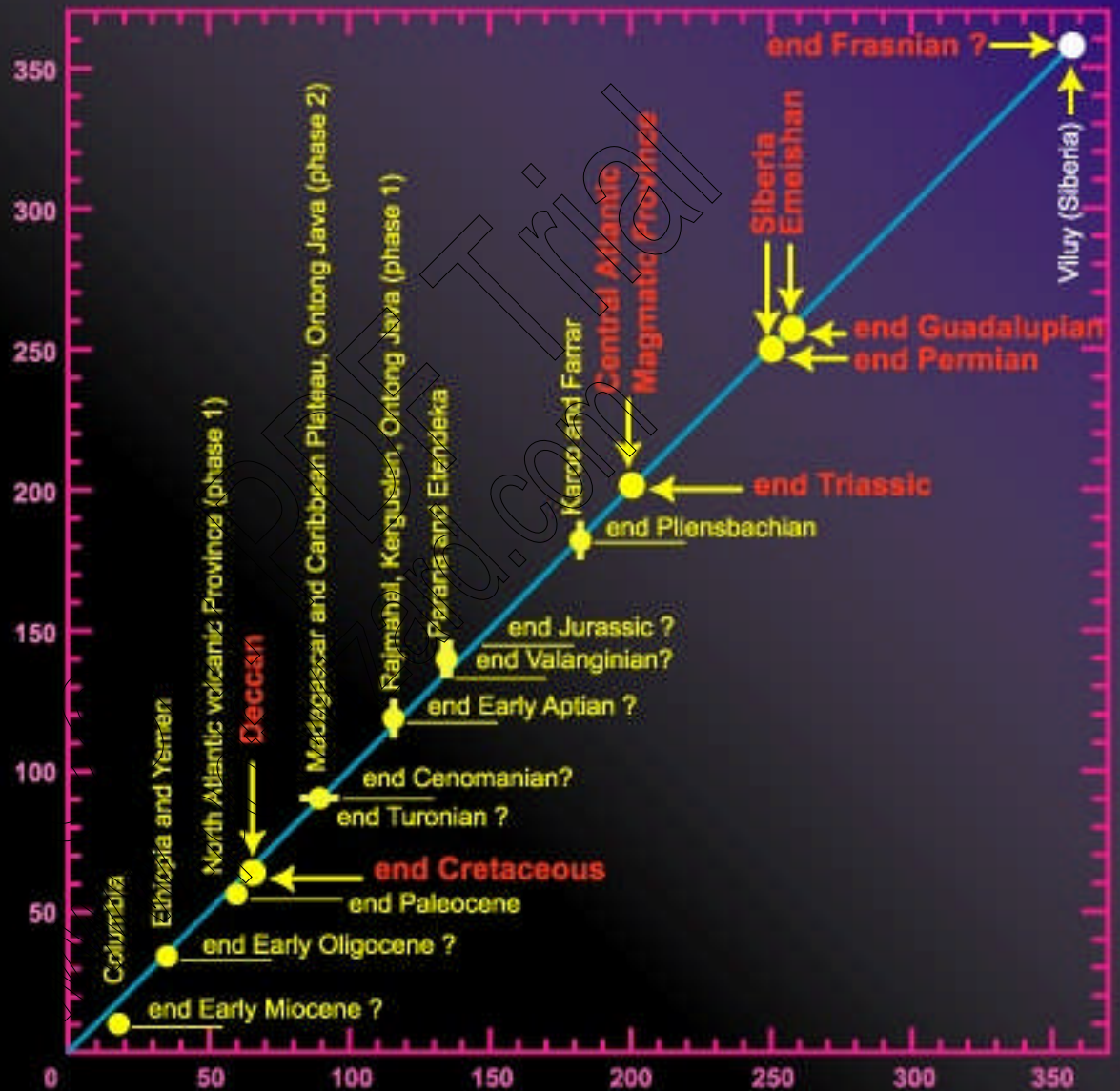


Trapps de Sibérie



- Empilements de coulées stratoïdes de laves continentales
- Volcanisme fissural, basalte tholéitique (points chauds)
- Surface de $2,5 \cdot 10^6 \text{Km}^2$
- Épaisseur de 3700m
- $2 \text{ à } 3 \text{ millions de Km}^3$ sortis au cours de 11 phases éruptives
- Juste à la limite P/T, durée $\approx 1 \text{Ma}$

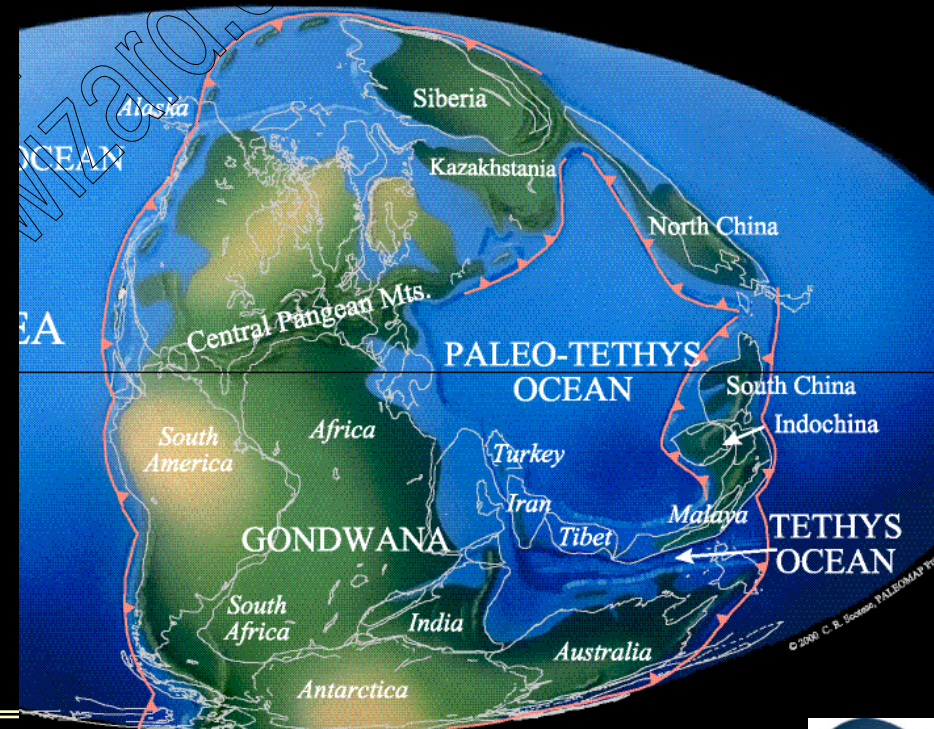
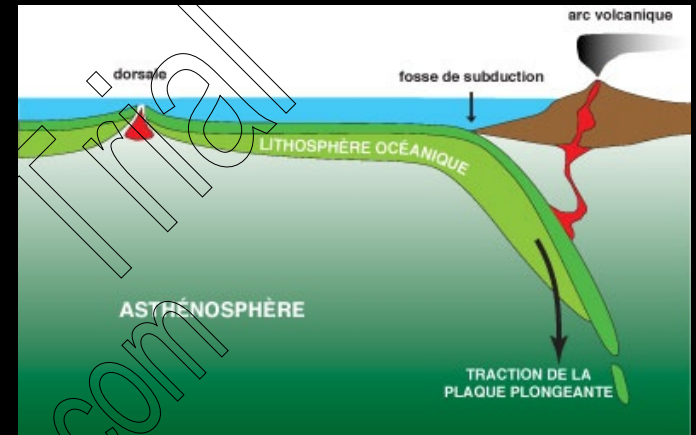
**Ages of mass extinctions, oceanic anoxia events
 and geological time scale boundaries (Ma)**



Ages of Continental flood basalts or Oceanic plateaus (Ma)

Volcanisme de subduction

- En Chine du Sud, existe, juste sous la limite P/T, un niveau volcanique provenant d'éruptions pyroclastiques de zones de subductions.
- Le volume est estimé à **100km³**.
- Avec la reprise de l'expansion océanique mésozoïque, dès le Permien terminal, l'activité des zones de subductions reprend.
- Ces subductions existent sur le pourtour de la Pangée et ce volcanisme, observé seulement en Chine est sûrement très sous-estimé



Conséquences du volcanisme

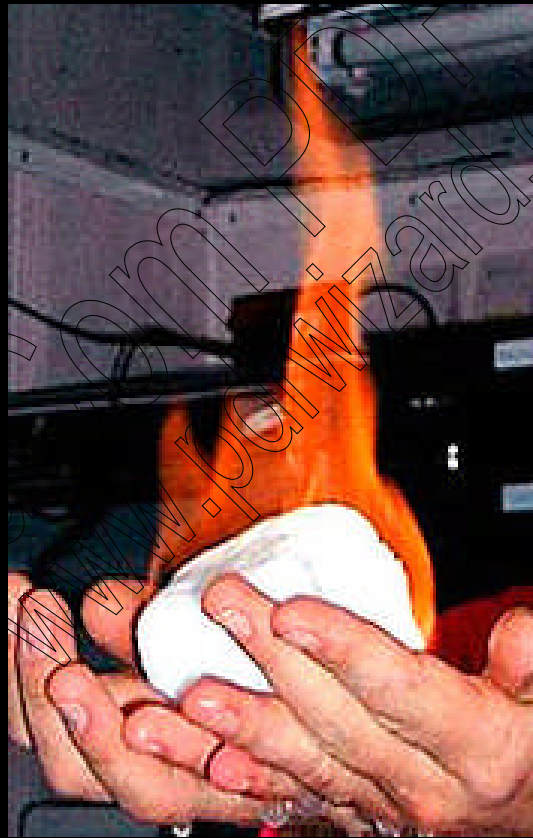
- Les cendres ont *obscurci* le ciel \Rightarrow **refroidissement** à cours terme.
- Quantités SO_2 et d'aérosols sulfatés \Rightarrow **pluies acides** \Rightarrow végétaux supérieurs et les insectes
- Le CO_2 \Rightarrow **effet de serre** \Rightarrow **réchauffement** à long terme 4 à 5°C.
- Une élévation de température de 5°C n'est pas suffisante pour expliquer l'ampleur des extinctions.
- Mais l'augmentation de 5° de la température de l'eau \Rightarrow
Relâche de gaz toxiques (H_2S – CH_4)

Les événements globaux à la limite Permien -Trias

Il n'y a pas de trace d'impact prouvée

- ✓ Changement climatique global
- ✓ Régression à la fin du Permien
- ✓ Volcanisme
- ✓ Relâche de gaz toxiques (H_2S – CH_4) au Trias basal

Les clathrates = hydrates de gaz



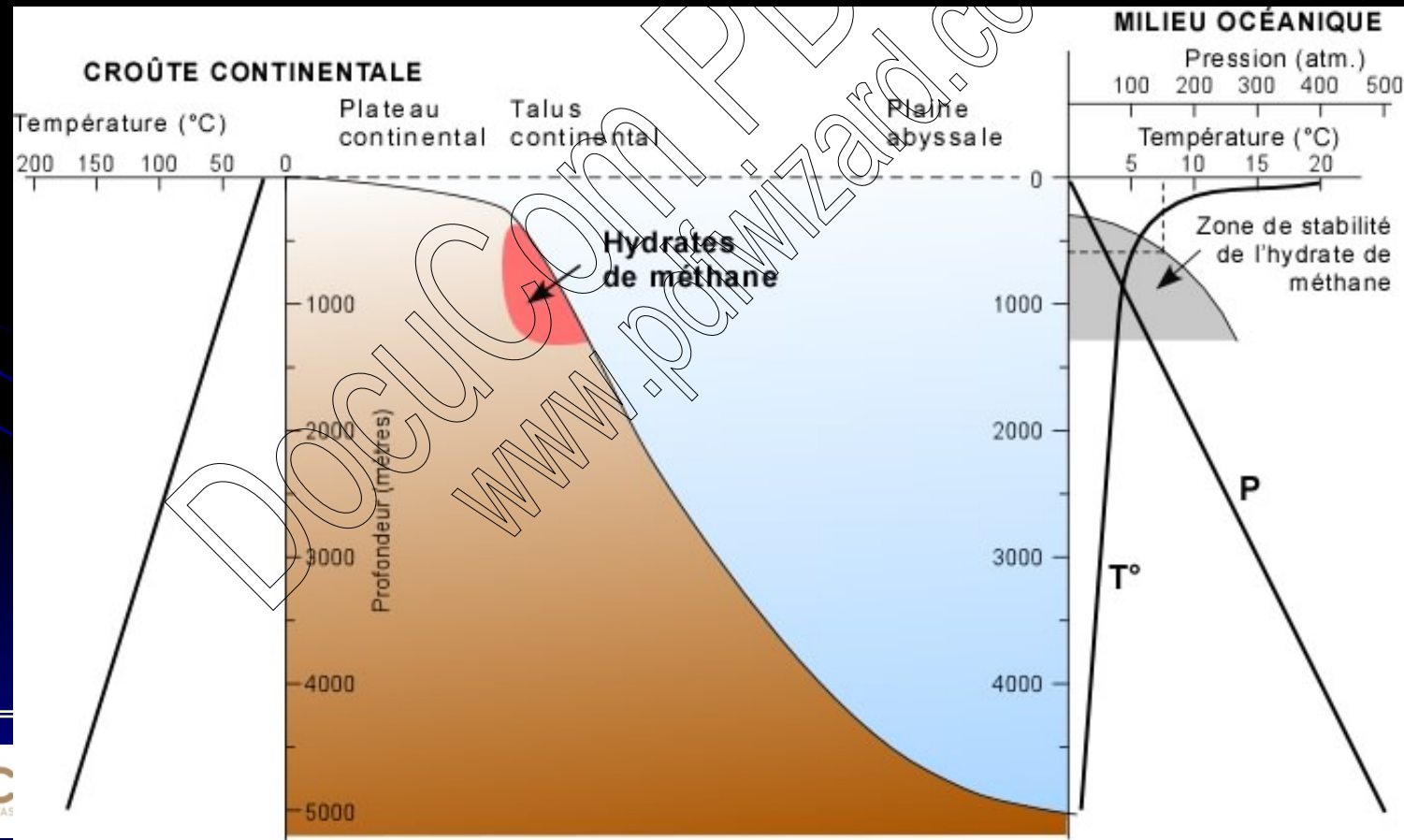
La glace qui brûle...

MO se dépose sur les fonds océaniques et est incorporée dans les sédiments.

Sous l'action des bactéries anaérobies, MO se transforme en méthane dans les premières centaines de mètres de la pile sédimentaire.

Un volume très important de méthane est ainsi produit.

Une partie de ce méthane se combine aux molécules d'eau pour former l'hydrate de méthane, dans une fourchette bien définie de température et de pression



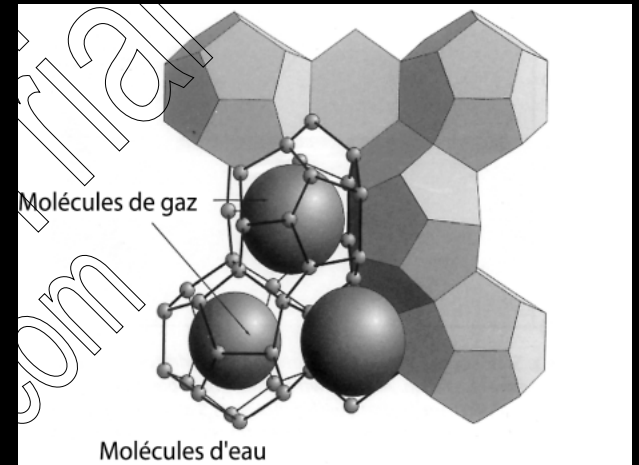
Méthane – CH₄

Sous P et T° particulières, la glace (H₂O) peut former une sorte de cage emprisonnant les molécules de gaz. On appelle les composés résultants des **hydrates de gaz** ou **clathrates**.

Le principal est l'hydrate de méthane
↗ qq °C ⇒ fonte clathrate et relâche
CH₄ (1 vol clathrate ⇒ 160 vol gaz
libre...)

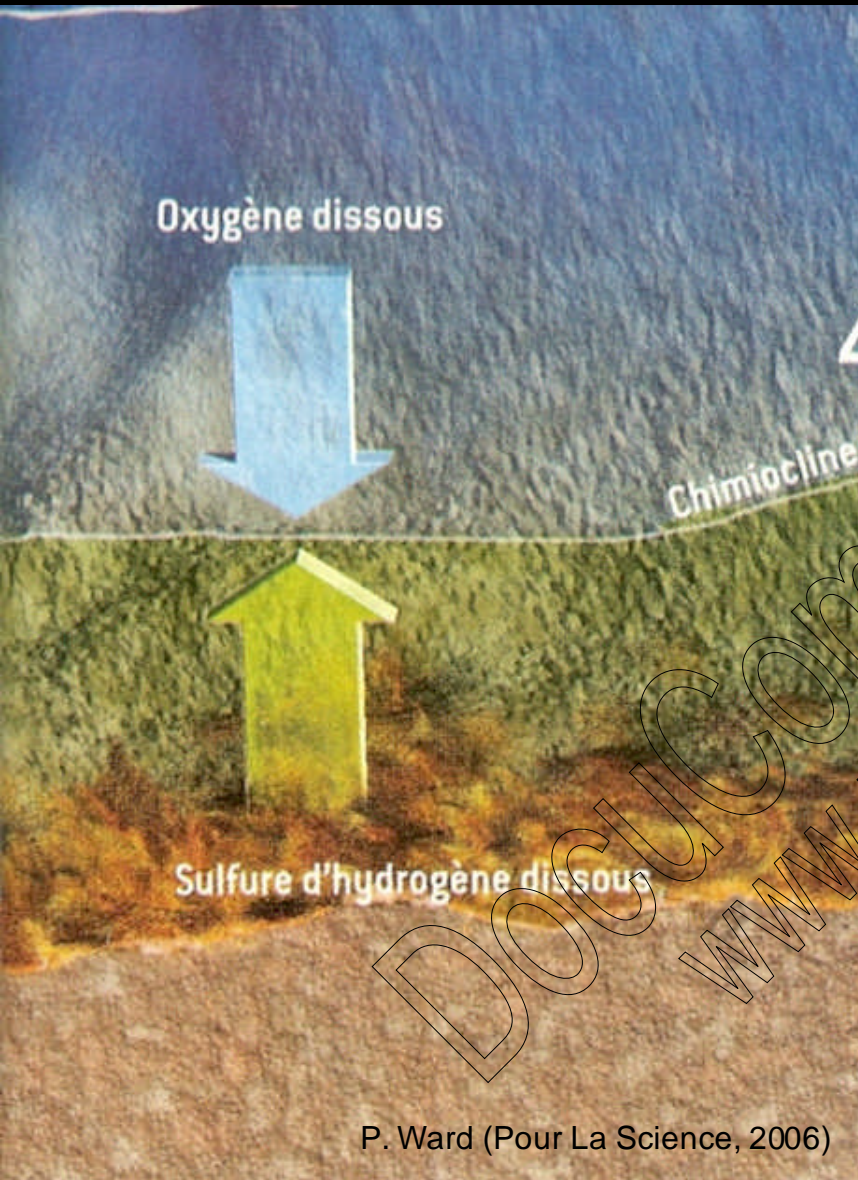
⇒ Effet de serre ⇒ ↗ T° globale de 5 °C
supplémentaires

→ → **Augmentation totale T° = 10°C**



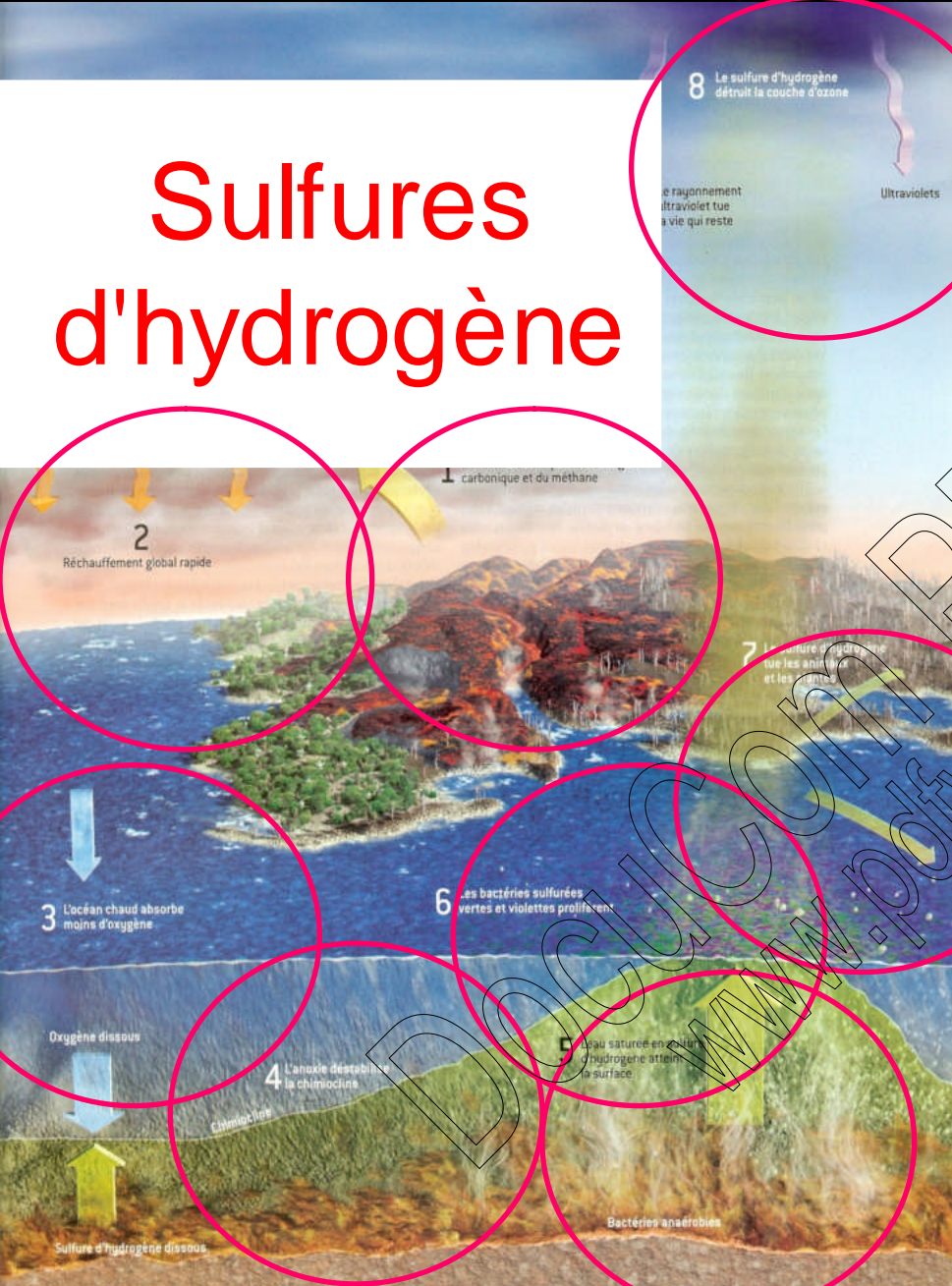
Structure d'hydrate de gaz de type I (d'après Suess, 2002)





La **chimiocline** est l'interface existant entre différentes couches d'eau, lorsque celles-ci ne se mélangent pas. Cela implique donc qu'il existe un équilibre entre les différentes couches d'eau. En général, les **couches d'eau de surface** sont **plus oxygénées** que les couches plus profondes, puisqu'elles sont alimentées par l'atmosphère. **L'anoxie des couches inférieures** peut être provoquée par la production importante de **sulfure d'hydrogène** par des micro-organismes benthiques. En dessous de la chimiocline peuvent se développer des **bactéries anaérobies**.

Sulfures d'hydrogène



1. Volcans \Rightarrow CO_2 et CH_4
2. Réchauffement
3. Température océan \nearrow
oxygène dissous \searrow
4. Déstabilisation zone
équilibre $\text{O}_2/\text{H}_2\text{S}$
5. H_2S remonte
6. Prolifération bactéries
sulfurées
7. H_2S dévaste le milieu
continental
8. H_2S détruit la couche
d'ozone
9. UV détruisent reste vie

P. Ward (Pour La Science, 2006)

Oreans
12 mai 2009

**Le volcanisme de Sibérie \Rightarrow augmentation de 5°C de la T°
Progressivement la température moyenne s'accroît. Les
espèces terrestres les moins résistantes, disparaissent
Les conséquences se répercutèrent dans les océans. La
température de l'eau augmenta entraînant la mort des
espèces marines.**

**Les eaux de plus en plus chaudes libèrent le méthane
des clathrates. La libération d'énormes quantités de
méthane, gaz à effet de serre, augmenta la température du
globe de 4 à 5°C .**

**Accroissement de la température moyenne de la Terre de
 10°C .**



Les événements globaux à la limite Permien -Trias

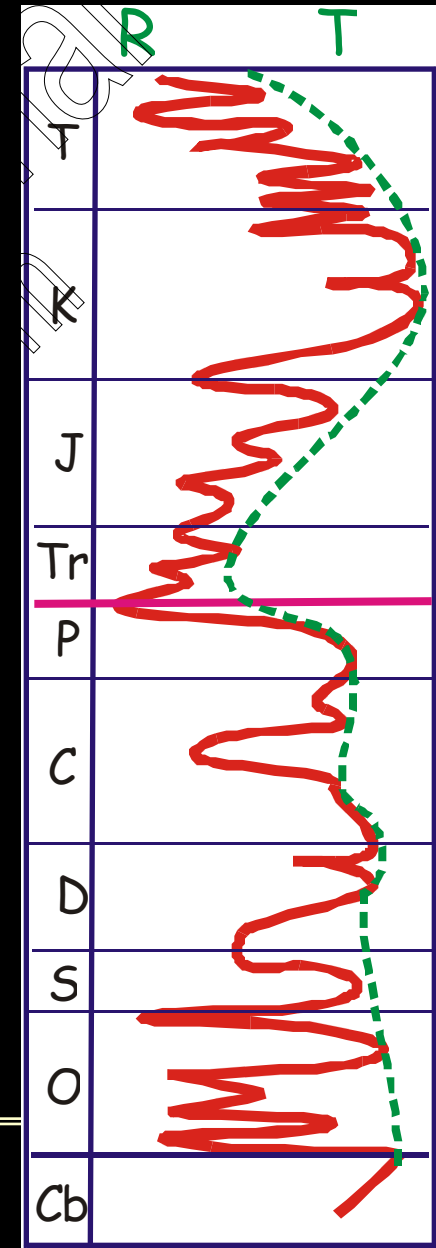
Il n'y a pas de trace d'impact prouvée

- ✓ Changement climatique global
- ✓ Régression à la fin du Permien
- ✓ Volcanisme
- ✓ Relâche de gaz toxiques (H_2S – CH_4) au Trias basal
- ✓ Transgression avec dysoxie au Trias basal



Transgression avec dysoxie

A la base du Trias, une transgression rapide et spectaculaire se met en place. Sur quelques milliers d'années, une remontée de $\approx 200\text{m}$. La teneur en O_2 est très faible dans toutes les mers épicontinentales. Partout des faciès réducteurs apparaissent (shales noirs ou micrites à cristaux de pyrite).



Causes

De la transgression

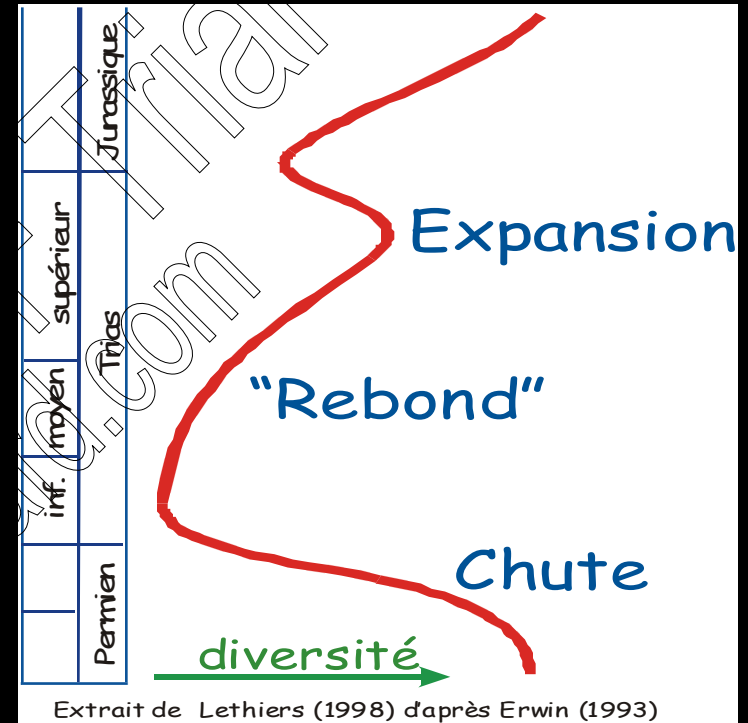
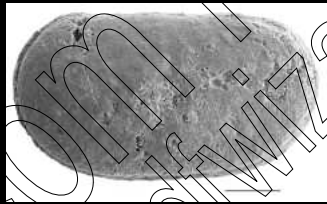
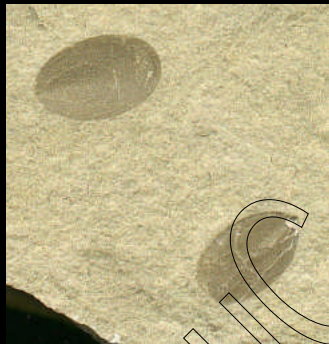
- Reprise du gonflement des dorsales: tecto-eustatisme positif
- Réchauffement général: thermo-eustatisme positif

De la dysoxie

- L'avancée des rivages engendre des mers pelliculaires aux eaux stagnantes
- La t° élevée empêche l'O₂ de se dissoudre en abondance
- L'eau aux hautes latitudes est chaude et il y a un ralentissement de la circulation profonde et donc de tout le système de circulation marine.

Effets sur la biosphère

Le Trias basal fut un temps **d'asphyxie brutale** des dernières communautés encore diversifiées. Ne subsistent que des associations peu diversifiées à *Claraia*, *Lingula* et ostracodes

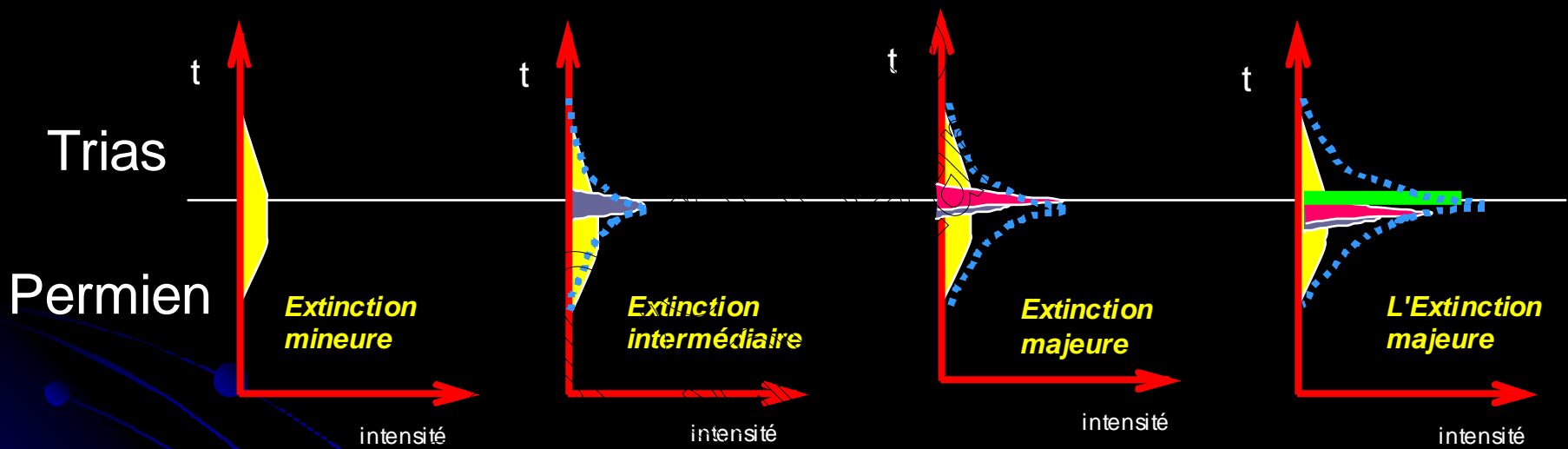


Les eaux pauvres en O_2 sont remontées (réduction du plancton)

Le manque d'oxygénation des eaux au Trias inférieur est sûrement la raison du retard de la reconquête

~-251Ma

Chute niveau marin Réchauffement + Volcanisme + CH₄+H₂S + Remontée mer sans oxygène



Sur 10Ma



La plus intense

**Permien -
Trias
-250 Ma**

Familles: -55%
genres: -80%
espèces: -95%

La plus connue

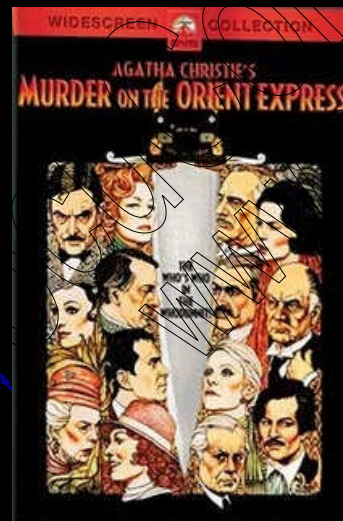
**Crétacé -
Tertiaire
-65 Ma**

Familles: -15%
genres: -45%
espèces: -75%



Il n'y pas **une** cause mais une **sommation**
et une **conjonction** de **causes** pour
expliquer la plus grande crise biologique
de tous les temps

C'est le crime de l'Orient Express!!



Après.....

Recolonisation très lente des biotopes marins

Au Trias basal (encore la "crise")

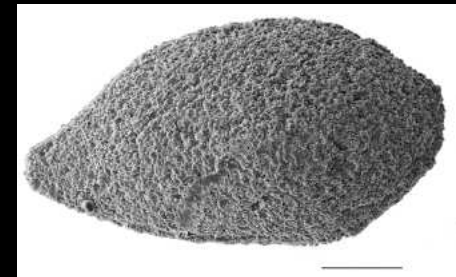
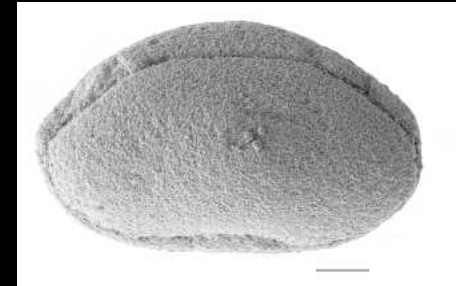
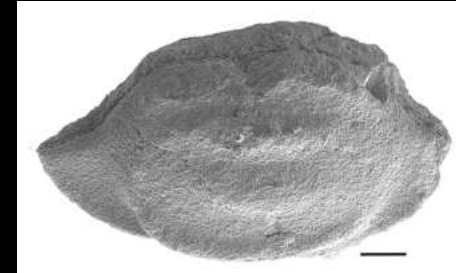
Claraia (bivalve), *Lingula* (Brachiopode) et ostracodes. Cette faune possède des espèces cosmopolites, généralistes écologiques, avec une très faible diversité et une très grande abondance avec des individus de petite taille, indices souvent caractéristiques des milieux dysoxygènes.



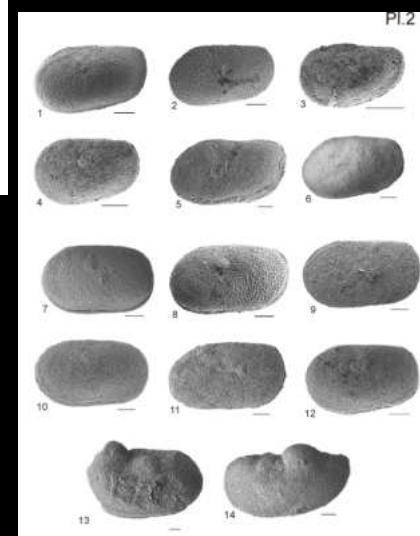
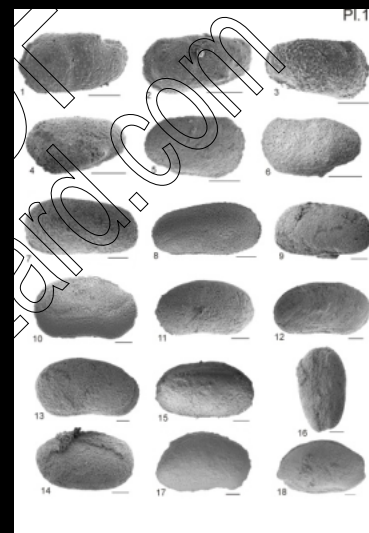
Claraia



Lingula

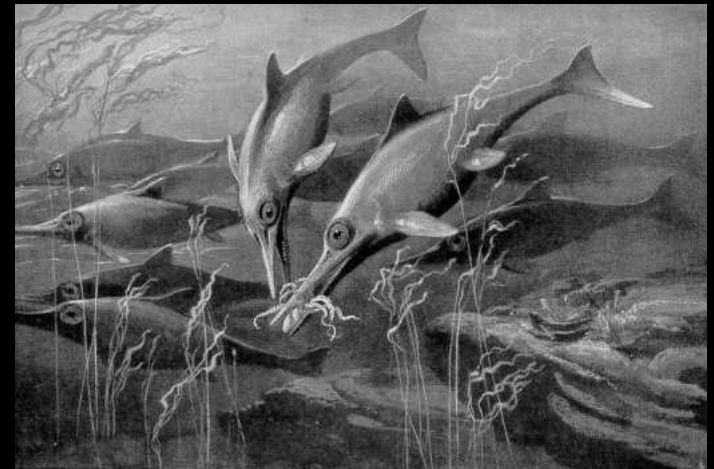
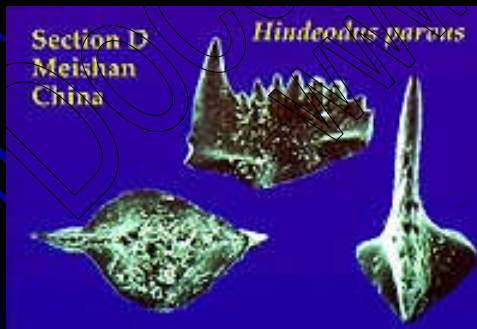
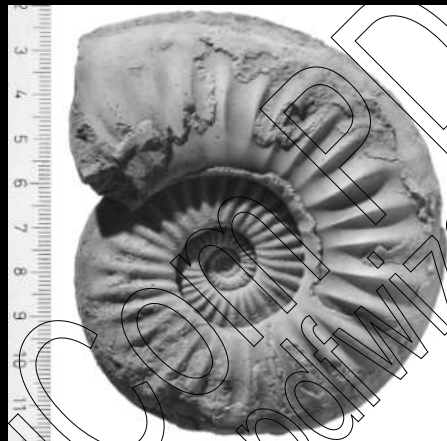


Au Trias basal on rencontre presque partout dans le monde des encroûtements :
les **microbialites** (microbes).



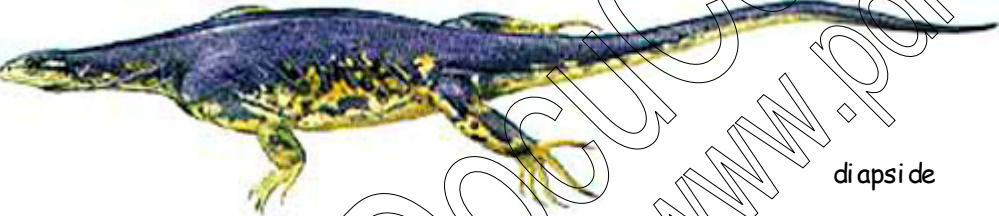
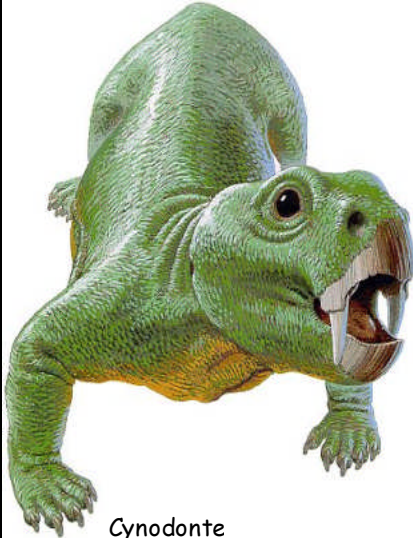
Au cours du Trias inférieur

Les Ammonoïdés et les conodontes vont se développer, rejoints ensuite par les reptiles colonisant les mers (plésiosaures, ichtyosaures,...).



Sur le continent...

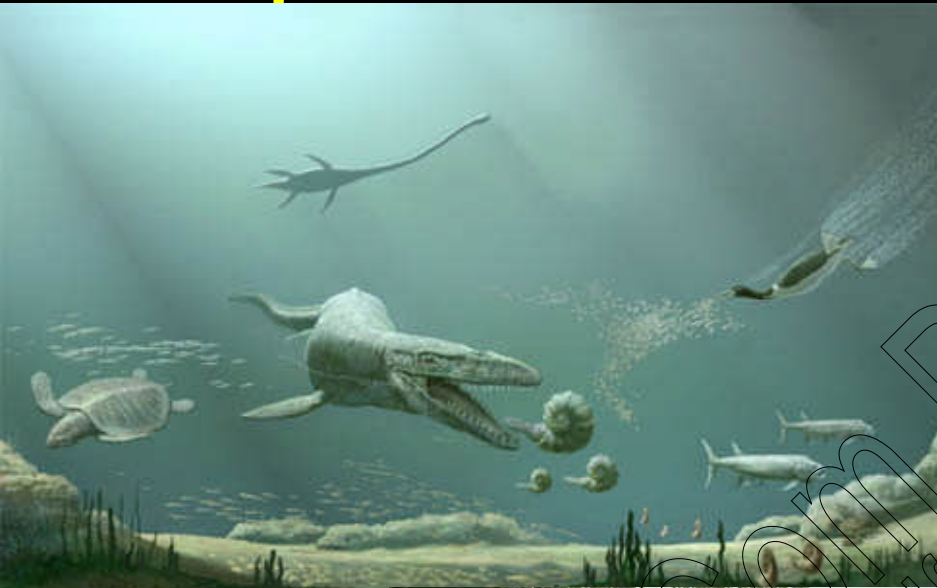
Au Trias moyen, une nouvelle faune apparaît comprenant les premiers diapsides (à l'origine des dinosaures), de nouveaux thérapside (*Lystrosaurus*) et des cynodontes (origine probable des mammifères).



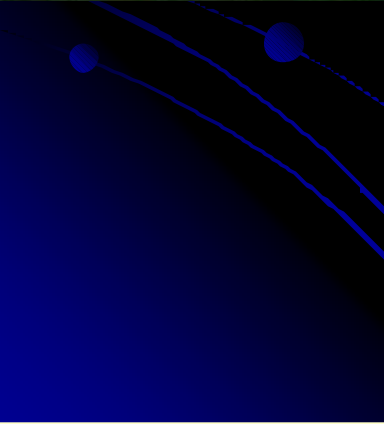
Nouvelle flore cosmopolite et peu exigeante à conifères (*Voltzia*), *Ginkgo*, Cycadales, nouvelles ptéridospermales (*Dicroidium*) et ptéridophytes.

A partir du Trias moyen (vers 230Ma)

Explosion de la vie Mésozoïque



©KarenCarr



©KarenCarr

Les points communs à toutes les extinctions en masse:

- ✓ L'intensité n'est pas la même en domaines marin et continental
- ✓ Les organismes intertropicaux sont plus touchés que ceux des hautes latitudes
- ✓ Les organismes d'eau douce survivent mieux que les marins
- ✓ Les organismes très spécialisés sont défavorisés vs généralistes
- ✓ Les espèces survivantes s'adaptent



Les extinctions d'espèces, même si elles sont brutales, sont des étapes **naturelles** de l'évolution de la biosphère. Elles permettent l'émergence et la diversification de nouvelles formes par libération des biotopes.

Mais.....

Aujourd'hui, pour la première fois dans toute l'histoire de la vie depuis son apparition, une espèce, l'*Homo sapiens*, modifie les processus naturels et cause l'extinction en masse d'autres espèces.....



Merci de votre attention



Petit déjeuner à Dali, Yunnan, Nov 2006