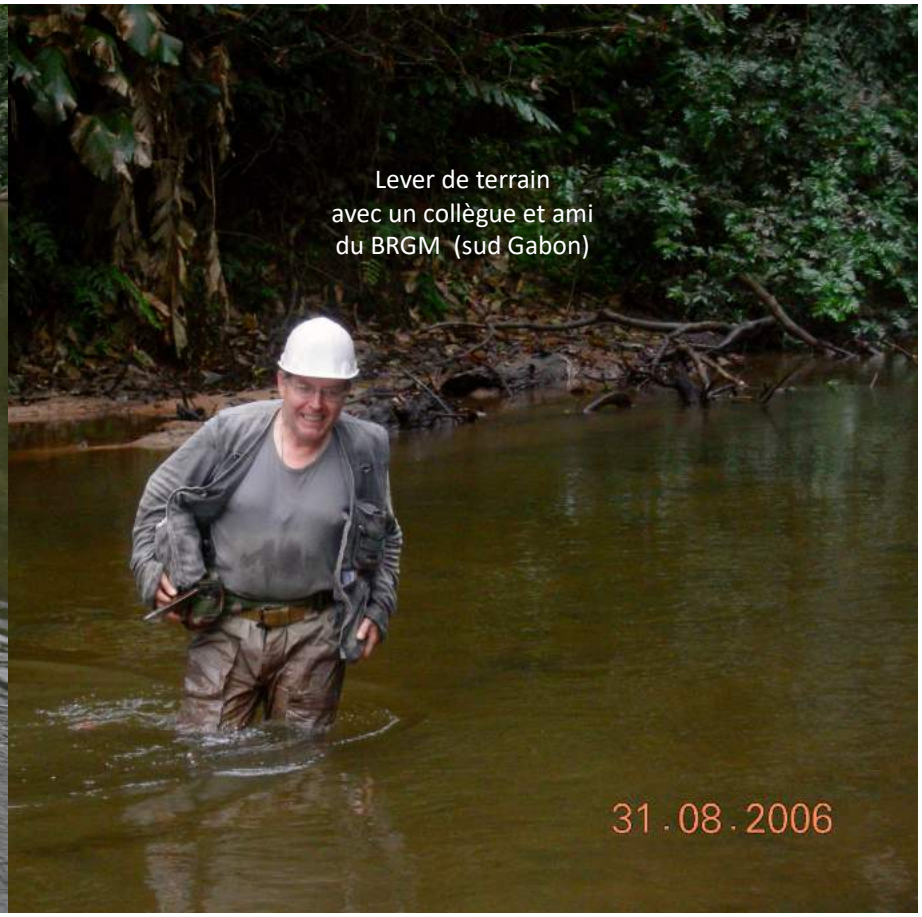
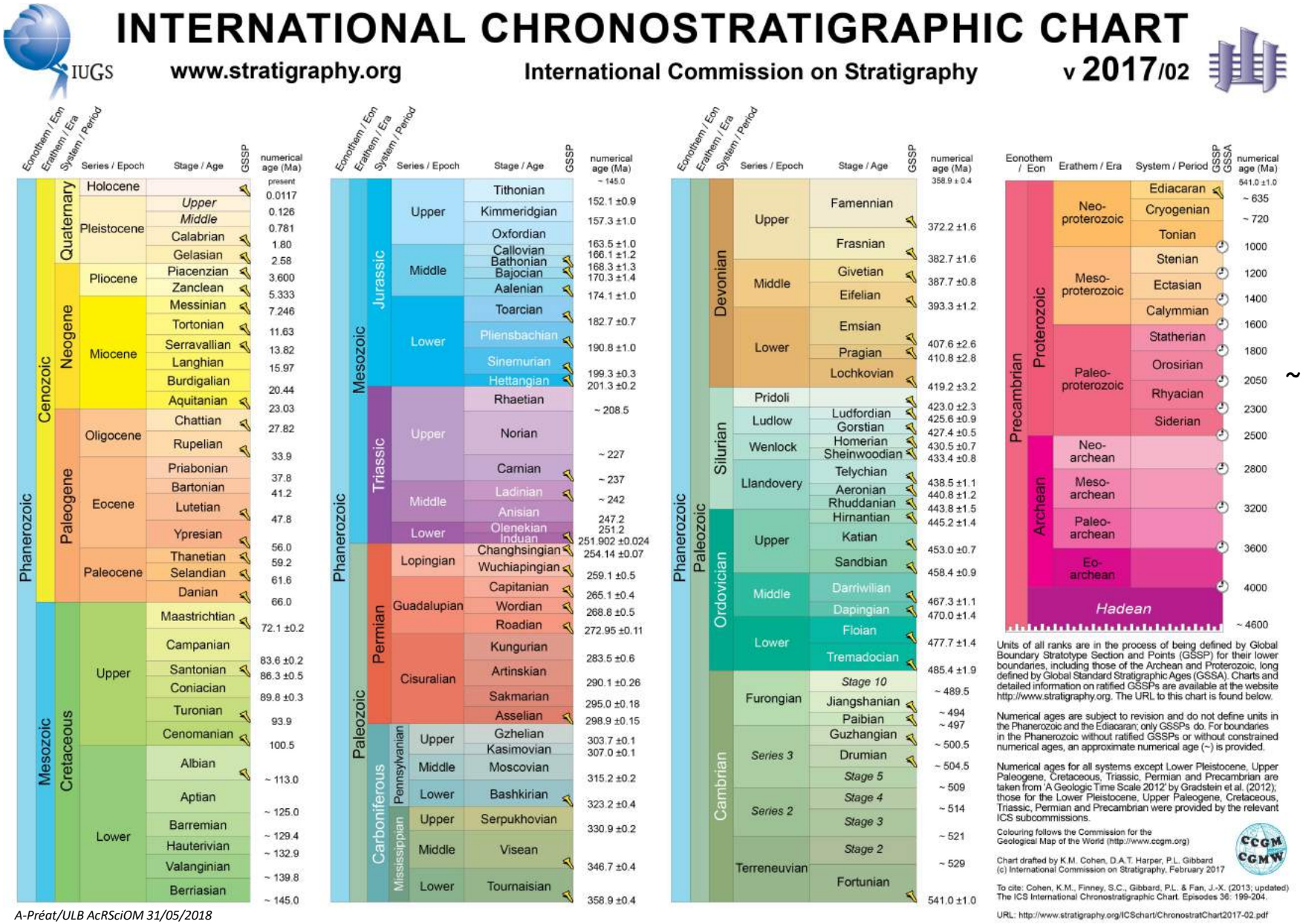
LE PRECAMBRIEN : QUE D'EVENEMENTS… riches d'enseignements

par Prof. Dr. A. Préat (ULB) 31-05-2018 Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer

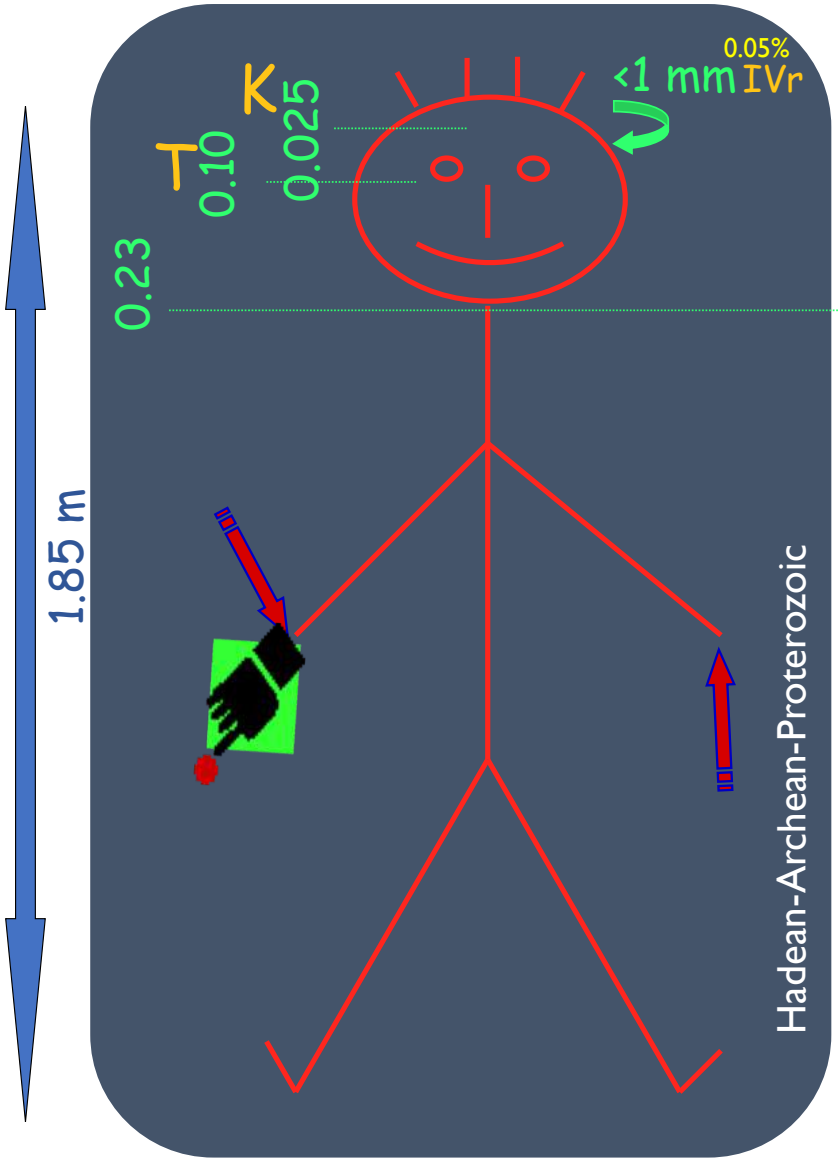



INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART
IUGS
www.stratigraphy.org
International Commission on Stratigraphy
v 2017/02
Eonothem / Eon
Erathem / Era
System / Period
Series / Epoch
Stage / Age
GSSP
numerical age (Ma)
Phanerozoic
Cenozoic
Quaternary
Holocene
Pleistocene
Upper
Middle
Calabrian
Gelasian
Neogene
Pliocene
Piacenzian
Zanclean
Miocene
Messinian
Tortonian
Serravallian
Langhian
Burdigalian
Aquitanian
Paleogene
Oligocene
Chattian
Rupelian
Eocene
Priabonian
Bartonian
Lutetian
Ypresian
Paleocene
Thanetian
Selandian
Danian
Mesozoic
Cretaceous
Upper
Maastrichtian
Campanian
Santonian
Coniacian
Turonian
Cenomanian
Lower
Albian
Aptian
Barremian
Hauterivian
Valanginian
Berriasian
Jurassic
Tithonian
Kimmeridgian
Oxfordian
Callovian
Bathonian
Bajocian
Aalenian
Toarcian
Pliensbachian
Sinemurian
Hettangian
Triassic
Rhaetian
Norian
Carnian
Ladinian
Anisian
Olenekian
Induan
Paleozoic
Permian
Lopingian
Guadalupian
Cisuralian
Changhsingian
Wuchiapingian
Capitanian
Wordian
Roadian
Kungurian
Artinskian
Sakmarian
Asselian
Carboniferous
Pennsylvanian
Mississippian
Gzhelian
Kasimovian
Moscovian
Bashkirian
Serpukhovian
Visean
Tournaisian
Devonian
Famennian
Frasnian
Givetian
Eifelian
Emsian
Pragian
Lochkovian
Silurian
Pridoli
Ludlow
Ludfordian
Gorstian
Wenlock
Homerian
Sheinwoodian
Llandovery
Telychian
Aeronian
Rhuddanian
Ordovician
Hirnantian
Katian
Sandbian
Darriwilian
Dapingian
Floian
Tremadocian
Cambrian
Furongian
Stage 10
Jiangshanian
Paibian
Series 3
Guzhangian
Drumian
Stage 5
Series 2
Stage 4
Stage 3
Terreneuvian
Stage 2
Fortunian
Precambrian
Proterozoic
Neo-proterozoic
Meso-proterozoic
Paleo-proterozoic
Ediacaran
Cryogenian
Tonian
Stenian
Ectasian
Calymmian
Statherian
Orosirian
Rhyacian
Siderian
Archean
Neo-archean
Meso-archean
Paleo-archean
Eo-archean
Hadean
Units of all ranks are in the process of being defined by Global Boundary Stratotype Section and Points (GSSP) for their lower boundaries, including those of the Archean and Proterozoic, long defined by Global Standard Stratigraphic Ages (GSSA). Charts and detailed information on ratified GSSPs are available at the website http://www.stratigraphy.org. The URL to this chart is found below.
Numerical ages are subject to revision and do not define units in the Phanerozoic and the Ediacaran; only GSSPs do. For boundaries in the Phanerozoic without ratified GSSPs or without constrained numerical ages, an approximate numerical age (~) is provided.
Numerical ages for all systems except Lower Pleistocene, Upper Paleogene, Cretaceous, Triassic, Permian and Precambrian are taken from 'A Geologic Time Scale 2012' by Gradstein et al. (2012); those for the Lower Pleistocene, Upper Paleogene, Cretaceous, Triassic, Permian and Precambrian were provided by the relevant ICS subcommissions.
Colouring follows the Commission for the Geological Map of the World (http://www.ccgm.org)
Chart drafted by K.M. Cohen, D.A.T. Harper, P.L. Gibbard (c) International Commission on Stratigraphy, February 2017
To cite: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013; updated) The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204.
URL: http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2017-02.pdf

~ 8/9

Numerical dating gives absolute age for Earth of about 4.567 billion years

A long human lifetime (100 years) represents only about 0.000000002% of geological time

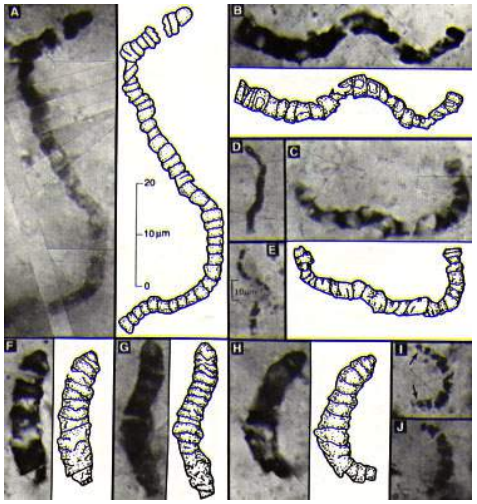


Phanerozoic
~ 1/9

0,541 Ga ± 1 Ma

Precambrian
~ 8/9

4,567 Ga ± 1 Ma (météorites)



MO

=

MATIERE ORGANIQUE

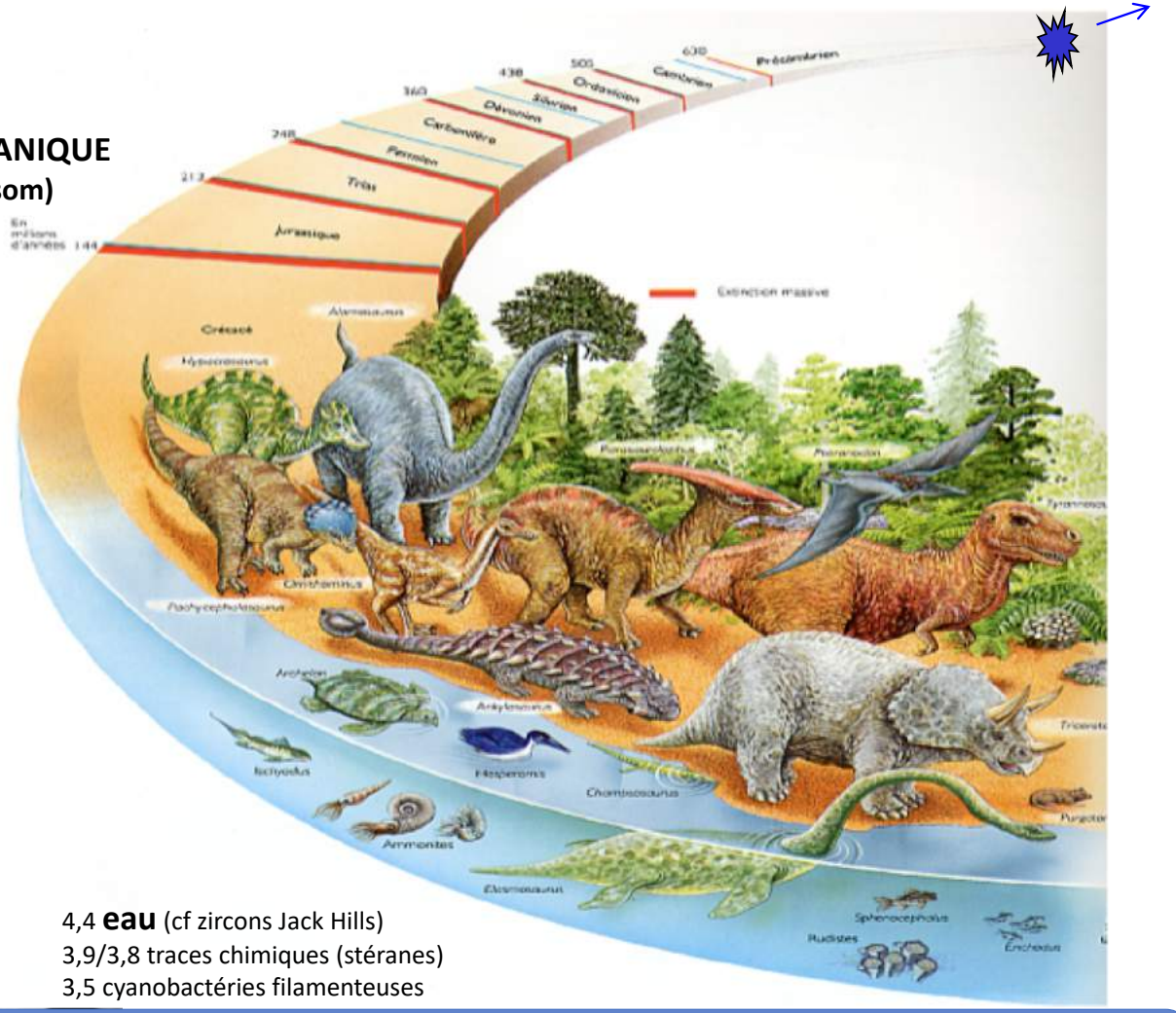
(prod<>consom)

et

O_2

Stromatolithe Ouest Australie 3,5 Ga Farabee, 2001

Cyanobactérie, Chert, Australie 3,465 Ga, Farabee, 2001

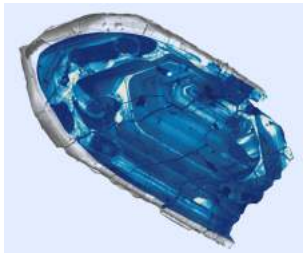


4,4 **eau** (cf zircons Jack Hills)

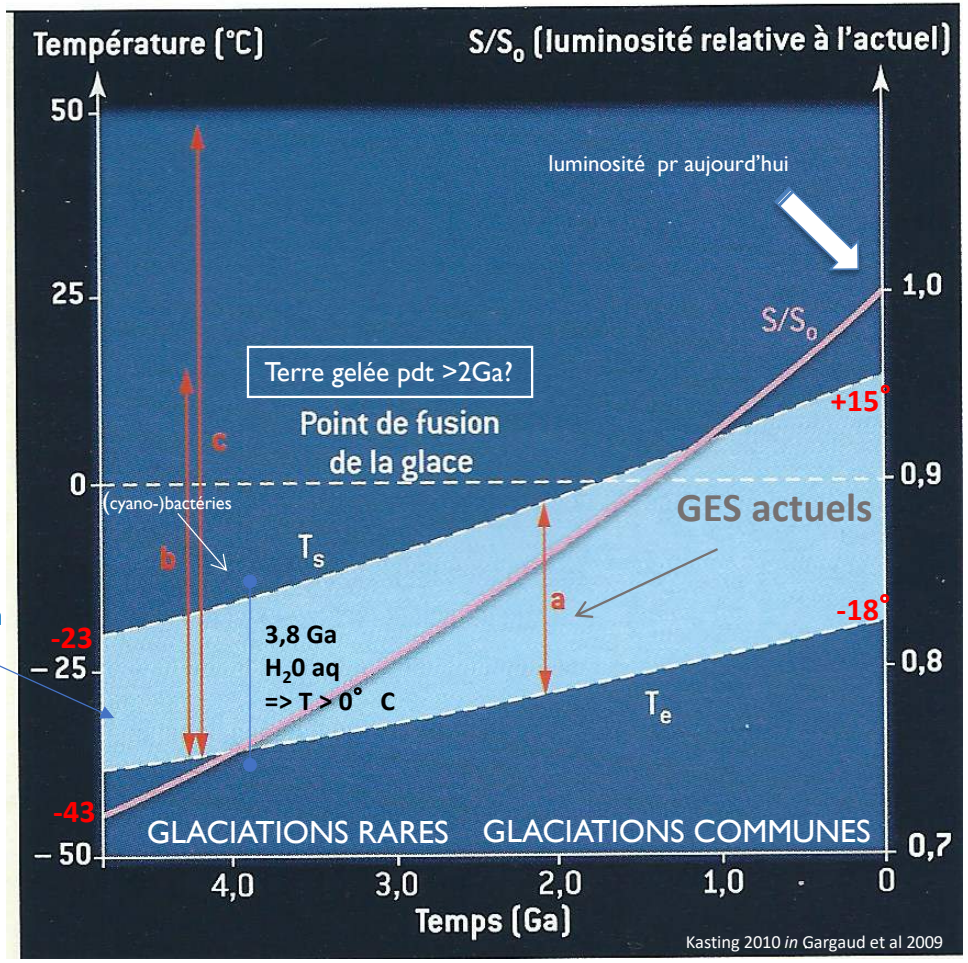
3,9/3,8 traces chimiques (stéranes)

3,5 cyanobactéries filamenteuses

FYS = Faint Young Sun ‘problem’ or ‘paradox’



4,4 Ga



L’eau (liquide) existe depuis au moins 4,4 Ga

Te Effective radiating temperature of the Earth (= T ‘sans atmosphère’)

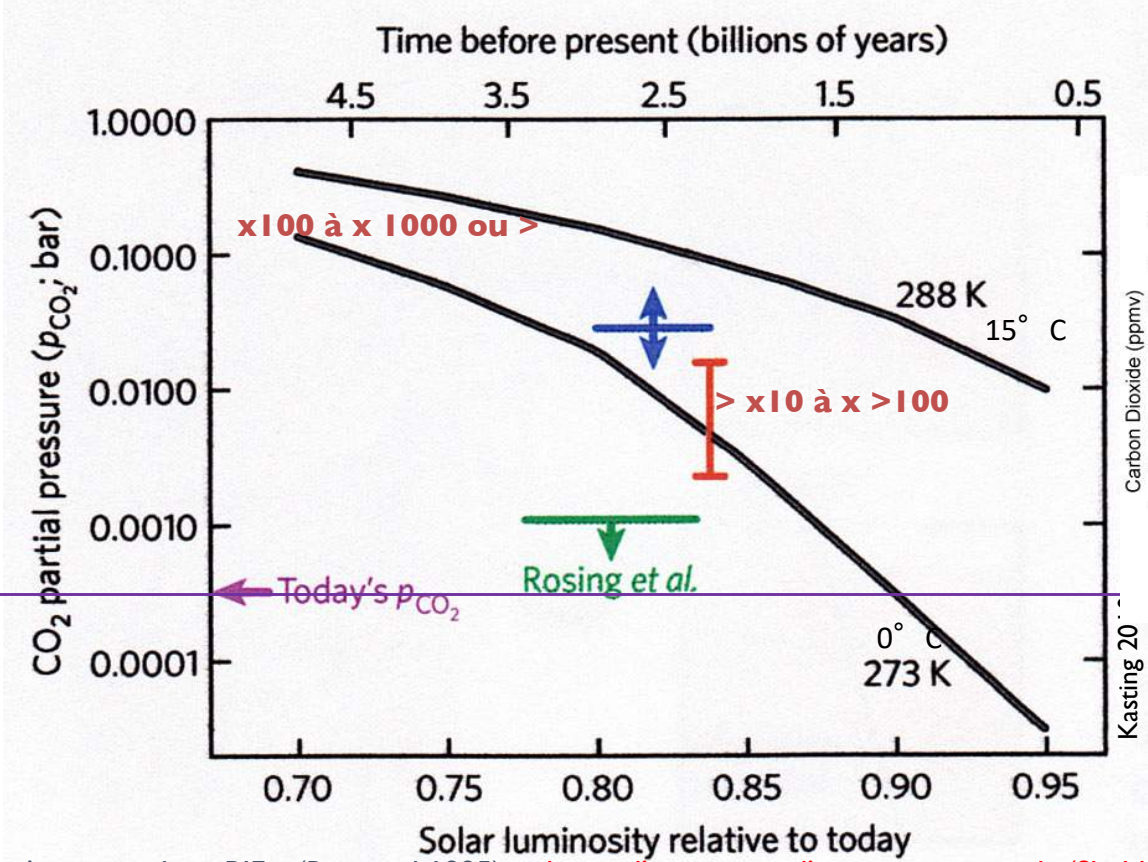
Ts Mean global surface temperature (with present day GHG composition)

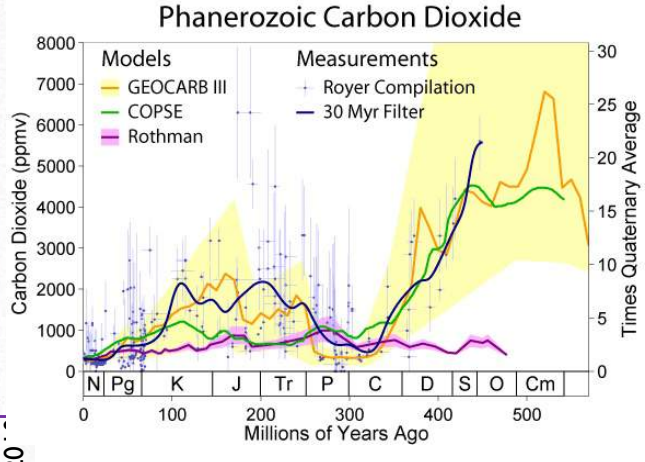
L’effet de serre AUGMENTE (zone grise)

car l’atmosphère renferme plus de vapeur d’eau avec l’augmentation de la T

FYS = Faint Young Sun 'problem' or 'paradox'

CONCENTRATION EN CO_2 DE L'ATMOSPHERE POUR COMPENSER
UNE FAIBLE LUMINOSITE SOLAIRE DANS LE PASSE



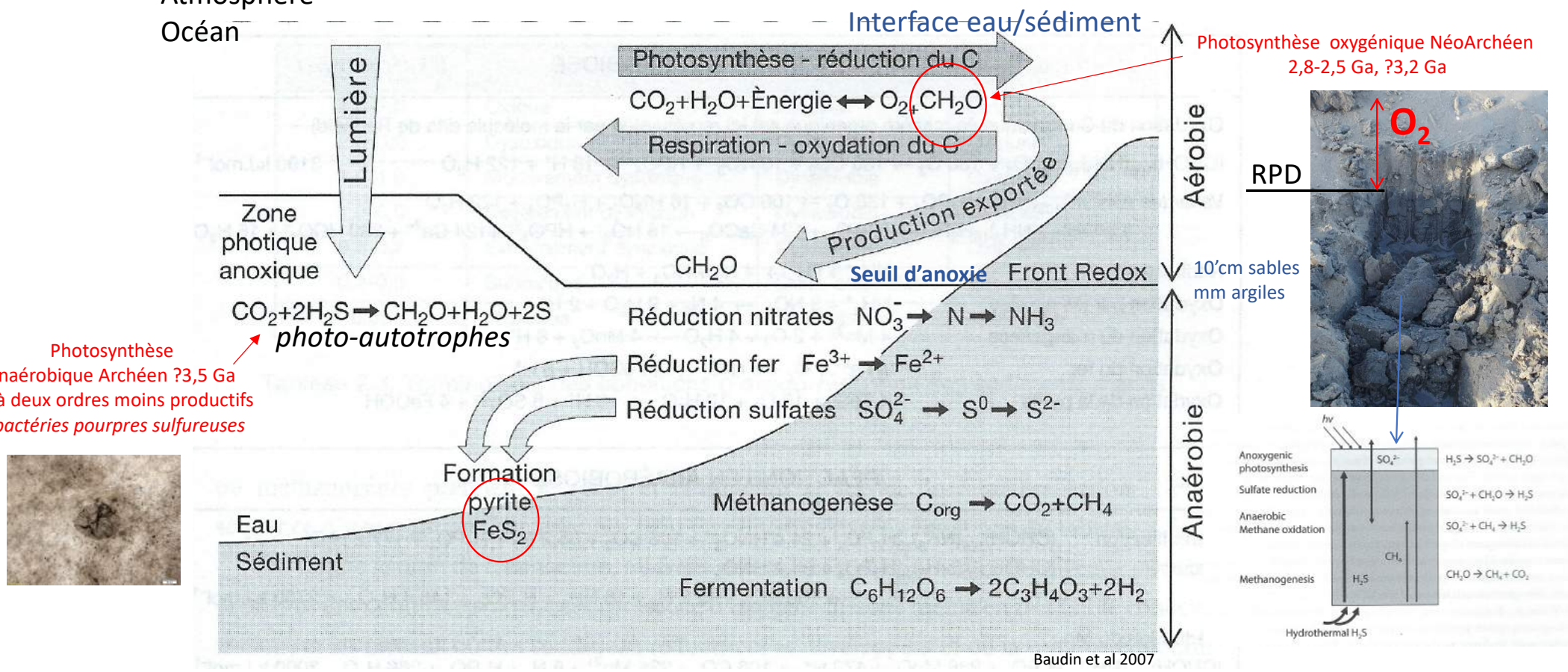


par tranche de 30Myr (existe aussi par 10 Myr)
2018 : 400 ppm

Anciens sols et BIFs (Rye et al 1995) et barre d'erreur sur d'autres anciens sols (Sheldon 2006)
Paléosols (Rosing et al 2010) et albédo plus faible? (peu de nuages, surfaces oc omniprésentes <> continents)
273 K freezing point
288 K to compare with modern value (avec CO_2-H_2O et albédo identiques)

DEGRADATION MO SOUS L' ACTION DES BACTERIES ANAEROBIQUES ET AEROBIQUES

Seuil d'anoxie >RPD



Photosynthèse oxygénique NéoArchéen
2,8-2,5 Ga, ?3,2 Ga

Photosynthèse anaérobique Archéen ?3,5 Ga
un à deux ordres moins productifs
= bactéries pourpres sulfureuses

Baudin et al 2007

L'O_2 atm s'accumule car la MO s'échappe du système à l'équilibre, <0,1% = kérogène = 'schistes bitumineux' (ex Cfère/Pm)
Au PCm: $2FeSO_4 + 2H_2SO_4 + Fe \Rightarrow 2\mathbf{FeS_2} + 2H_2O + 7\mathbf{O_2}$ => l'enfouissement de la pyrite a contrôlé le taux d'oxygène atmosphérique
Nb Faible taux SO_4 => les bassins anoxiques sont 'ferrifères', BIF : $Fe^{2+} > S^{2-}$ bassins euxiniques [$Fe^{2+}+HS^- = FeS + H^+$ et $Fe + S = FeS_2$]

L'ENFOUISSEMENT DE LA MATIERE ORGANIQUE A CONTRÔLE LE TAUX D'OXYGENE ATMOSPHERIQUE

$16H^+ + 16HCO_3^- <=> 16CH_2O + 16O_2$ photosynthèse (aérobie)

$8SO_4^{2-} + 16CH_2O <=> 16HCO_3^- + 8H_2S$ réduction sulfates (bactéries)

$8H_2S + 2Fe_2O_3 + O_2 <=> 8H_2O + 4FeS_2$ formation de pyrite (à partir FeS, greigite et mackinawite)

L'ENFOUISSEMENT DE LA PYRITE A CONTRÔLE LE TAUX D'OXYGENE ATMOSPHERIQUE

SOMME

$16H^+ + 8SO_4^{2-} + 2Fe_2O_3 <=> 8H_2O + 4\mathbf{FeS_2} + 15O_2$

L'HYDROGENE MANTELLIQUE A CONTRÔLE LE TAUX D'OXYGENE ATMOSPHERIQUE

$H_2 + 1/2O_2 <=> H_2O$

LE CO2 INTERVIENT DANS LES CYCLES LONGS ET COURTS

$6CO2 + 6H_2O <=> C_6H_{12}O_6 + O_2$

= LA TECTONIQUE (=…) AU PREMIER PLAN/OMNIPRESENTE MAIS 'INVISIBLE' …

ALTERATION

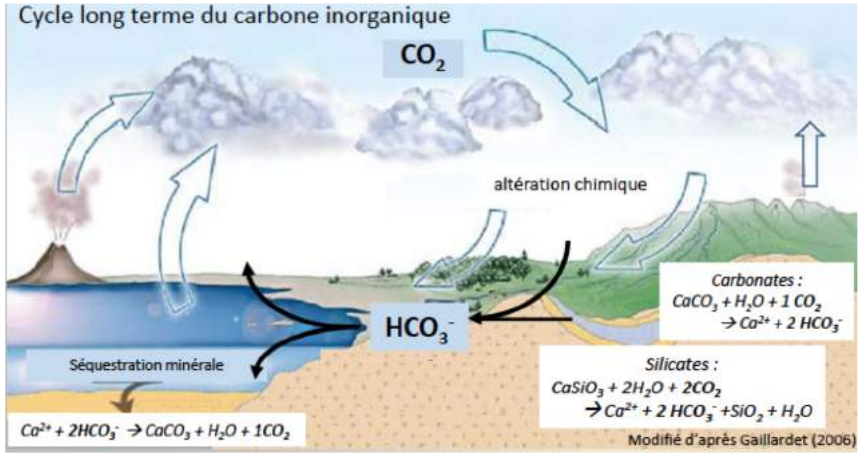
(et 'supercontinents)

=

'POMPE A CO_2'

Ex Himalaya…

34X CO_2 atm actuelle



LONG TERME

Altération des carbonates: $1CO_2$ prélevé=> $1CO_2$ libéré => 0 CO_2 séquestré

Altération des silicates: $2CO_2$ prélevés => $1CO_2$ libéré => 1 CO_2 séquestré

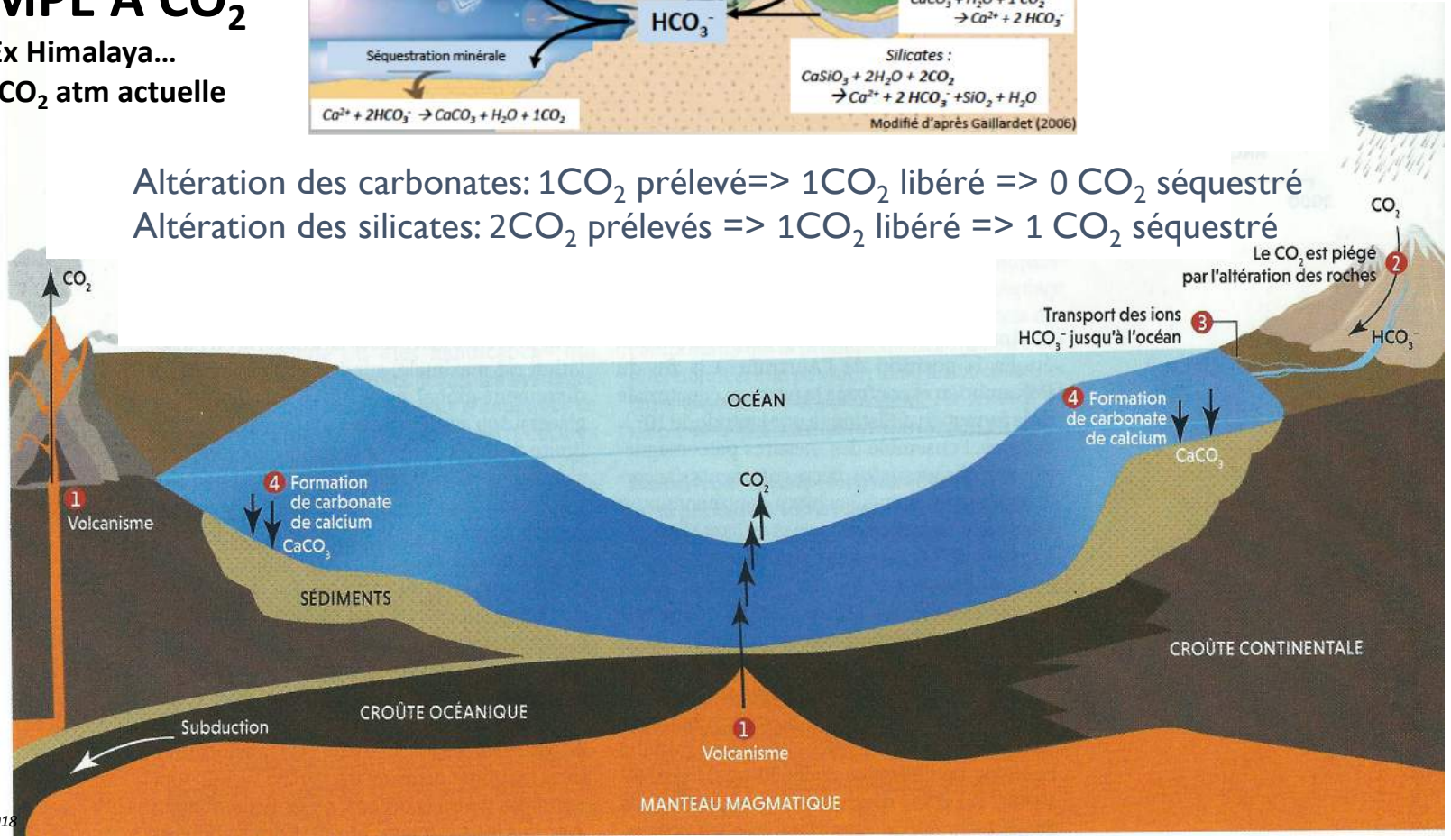
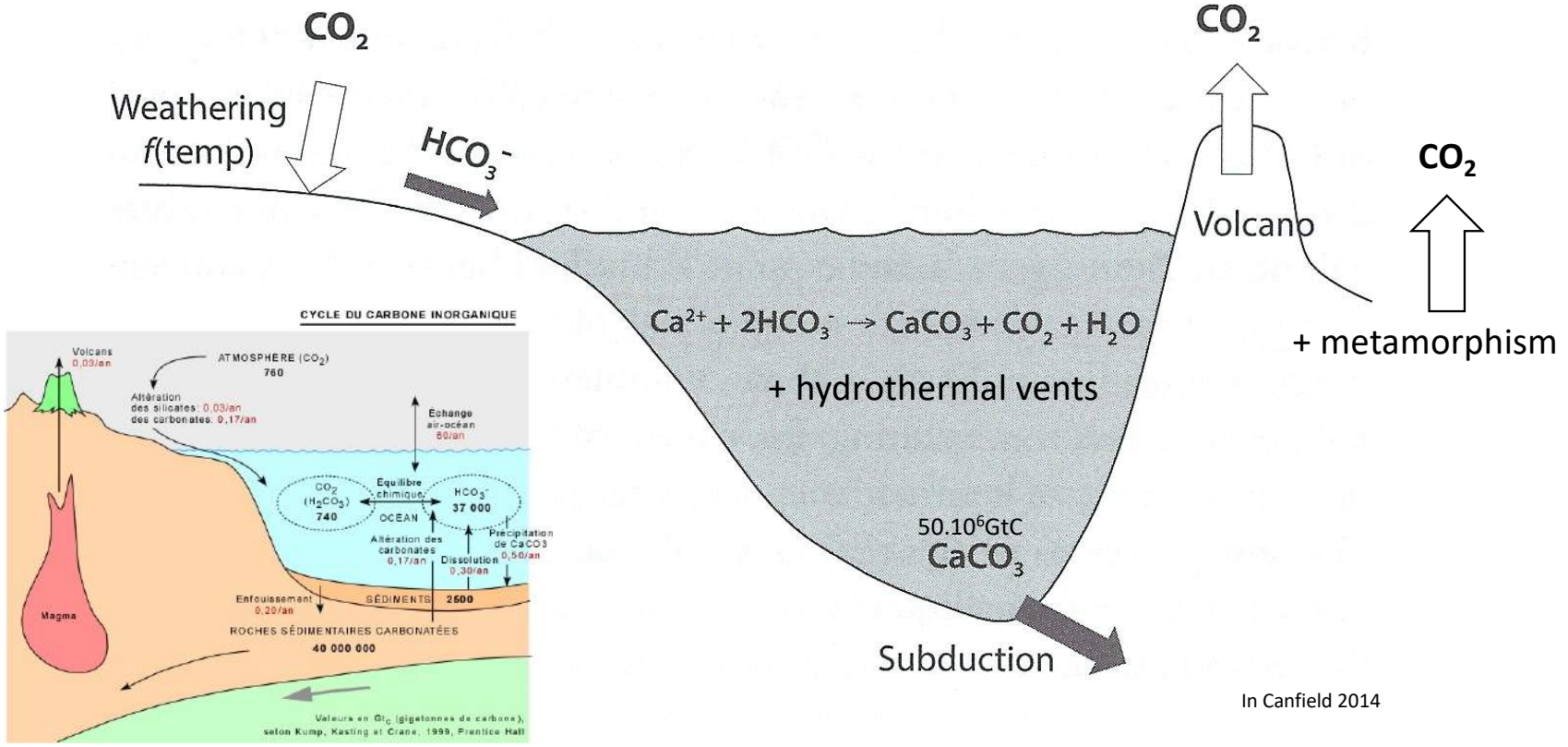
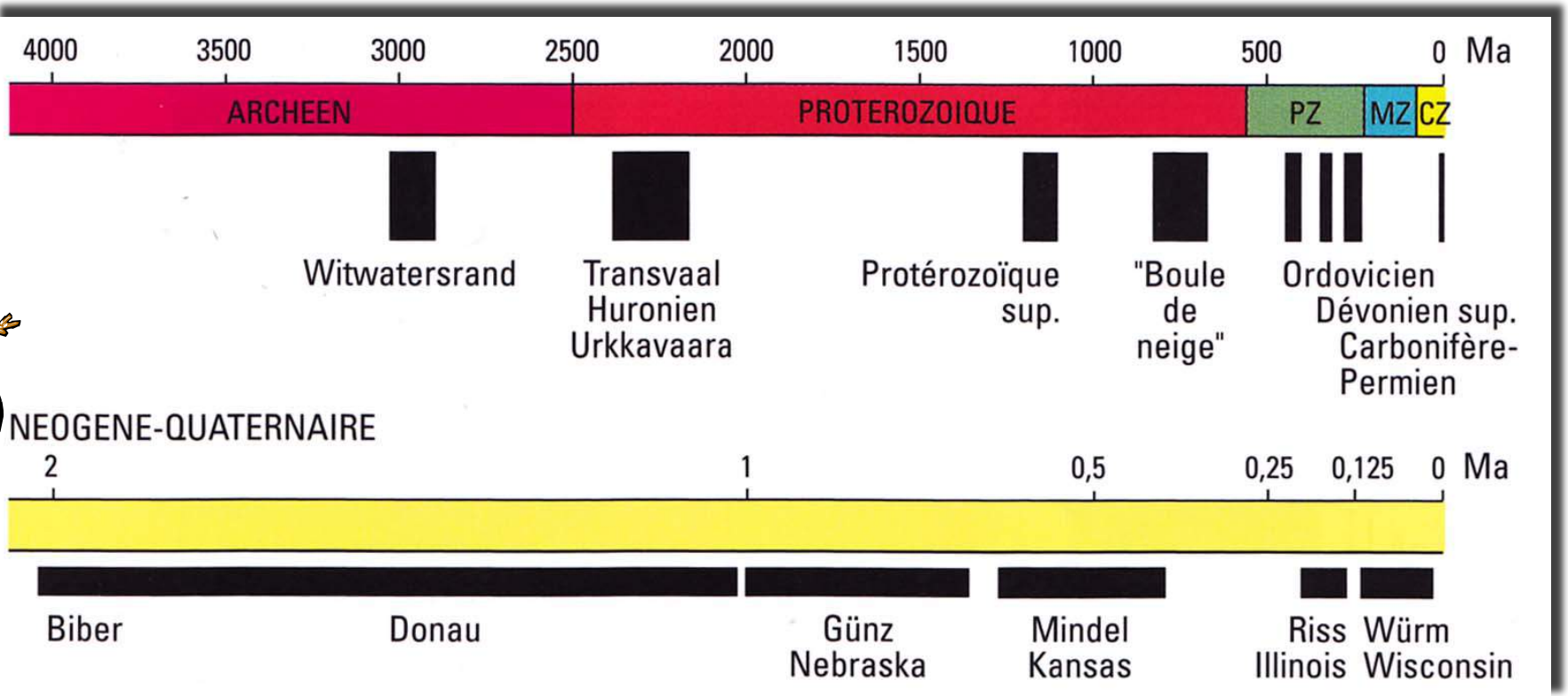


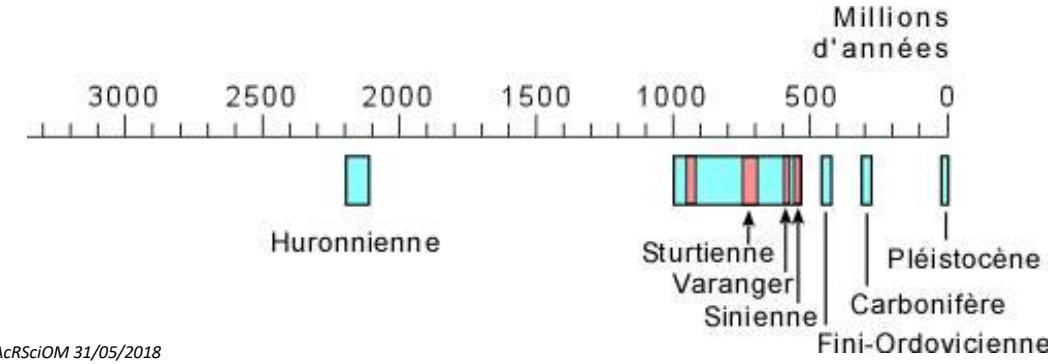
PLATE TECTONICS -long term
(- PHOTOSHYNTESIS -short term)



In Canfield 2014

Le CO_2 atm devrait être épuisé en 13 000 ans (PS) => recyclage de la MO par la tectonique… (ex : le pétrole)
A l'inverse si plus de pyrite et de MO sont disponibles pour l'oxydation => 'puits' à oxygène (ex : post-GOE)
La MO est complètement oxydée avec un taux d'oxygène d'au moins 25% l'Actuel





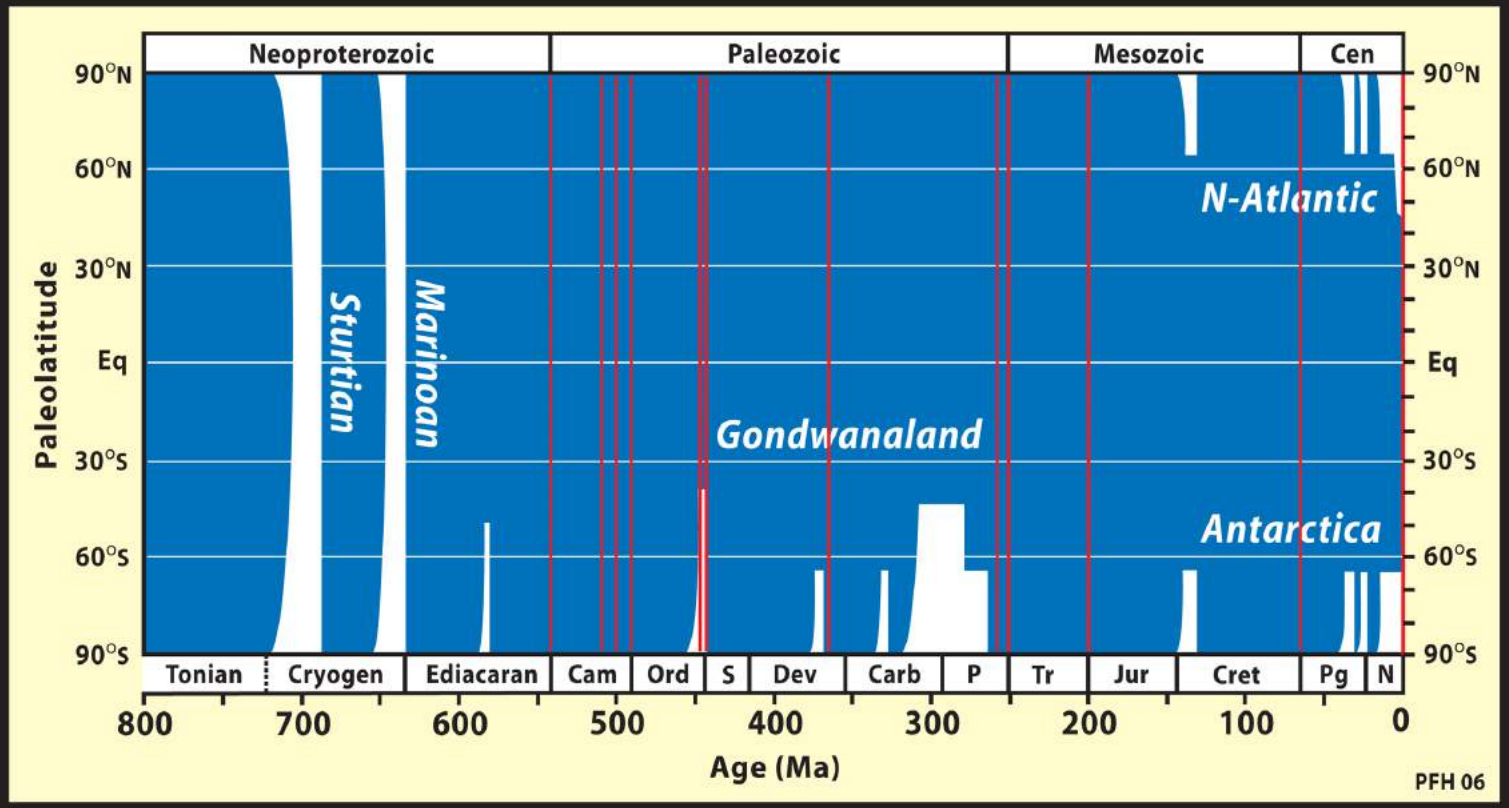
Mascle 2008

EN PERIODE GLACIAIRE

- **photosynthèse oxygénique chute**
- **larguage ^{12}C**

=> $CO_{2\ volc}$ (CH_4) augmente

Paleogeographic extent of continental ice sheets and permanent sea ice over the last 800 Myr (red lines indicate major mass extinctions)



http://www.snowballearth.org/s

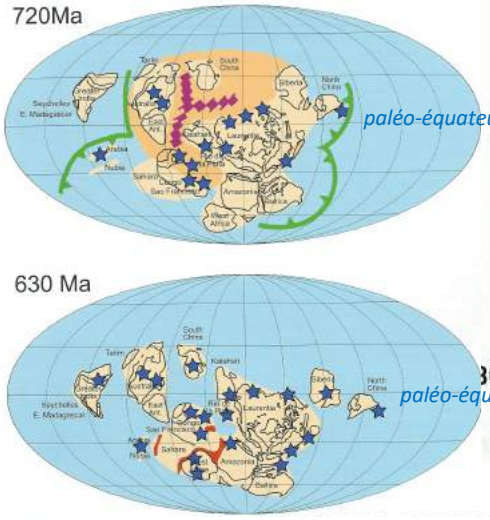
COLUMBIA/(NUNA)

1,8-1,5

SUPERCONTINENT RODINIA

1,1-0,7

★ Dépôts glaciaires [40°N-40°S]

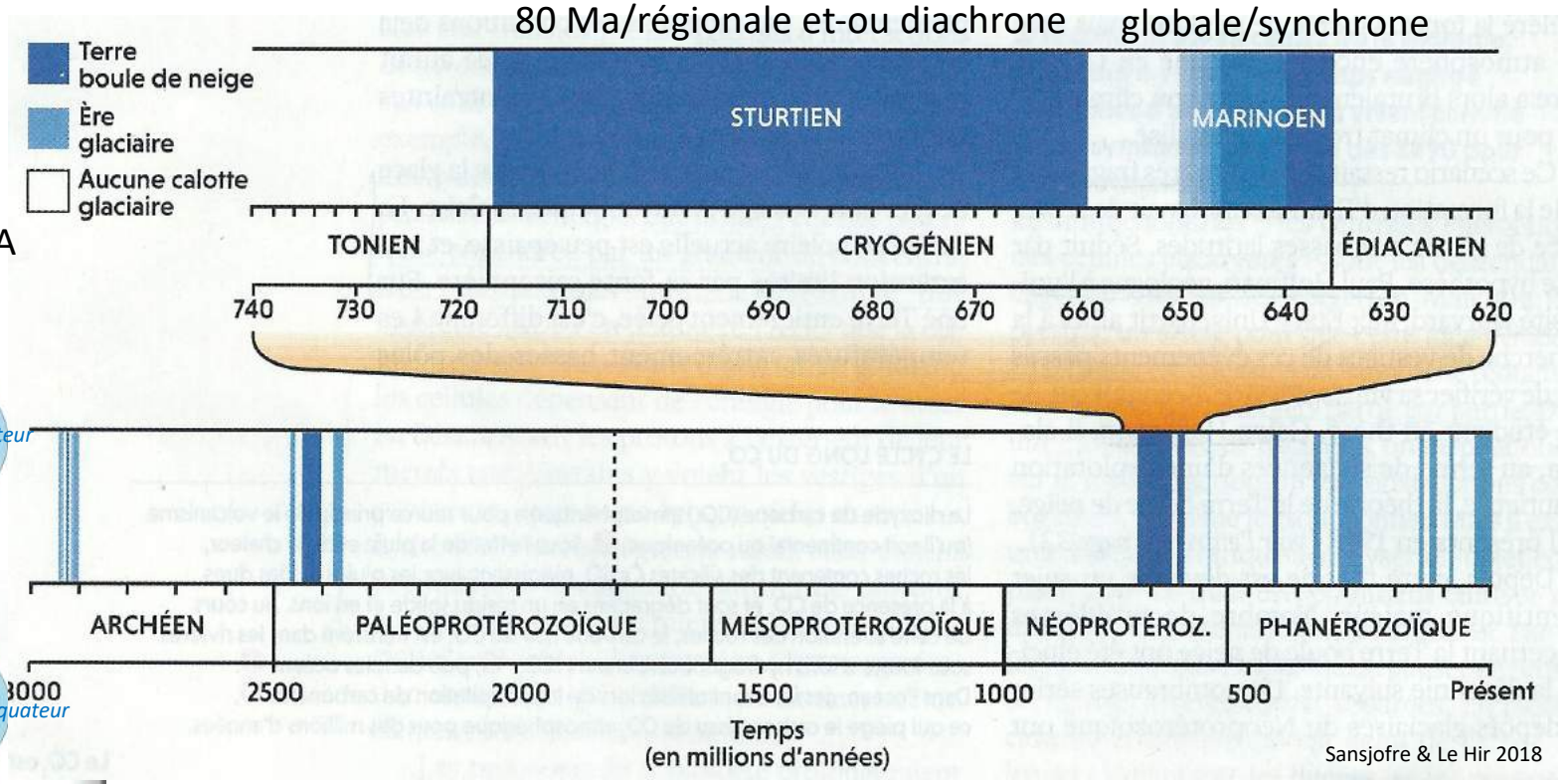


Li et al 2008

Aggrégation continents

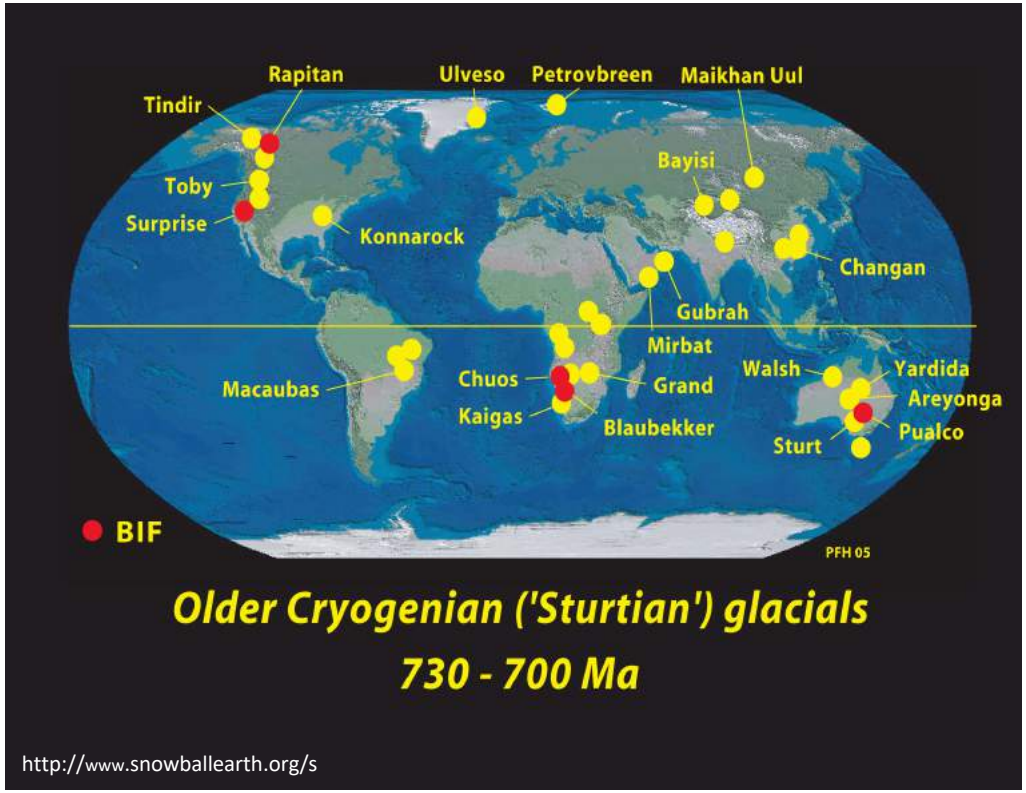
=> 'pompe CO_2'

GONDWANALAND

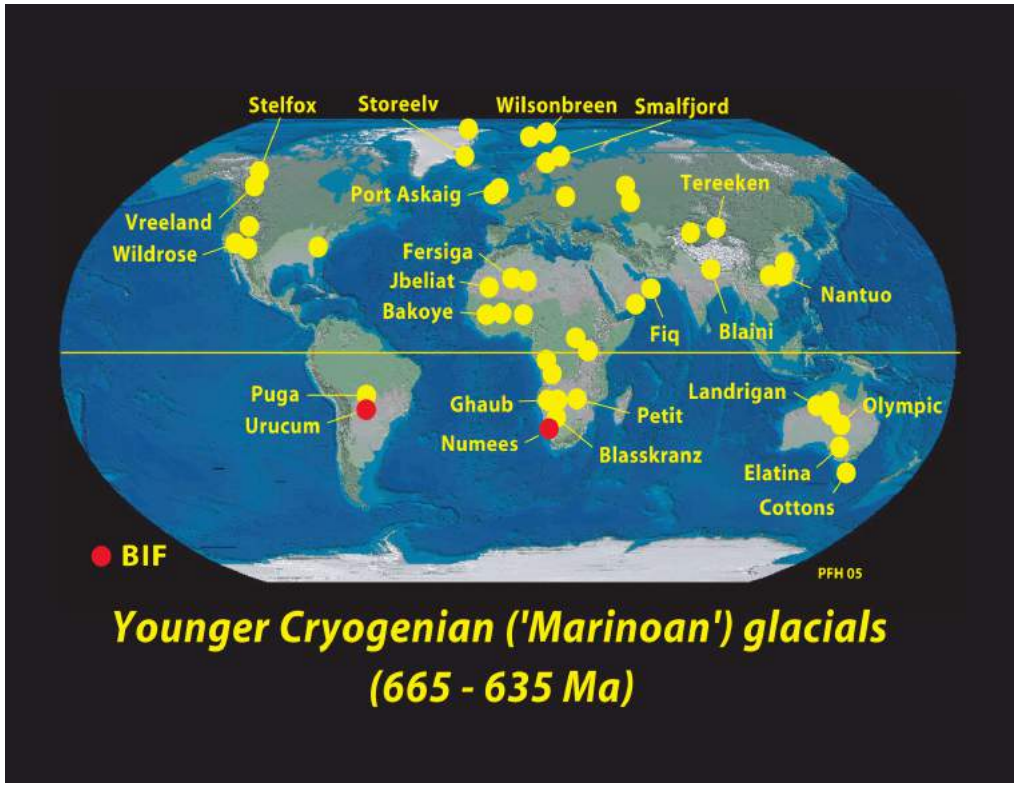


Sansjofre & Le Hir 2018

Préat 2006

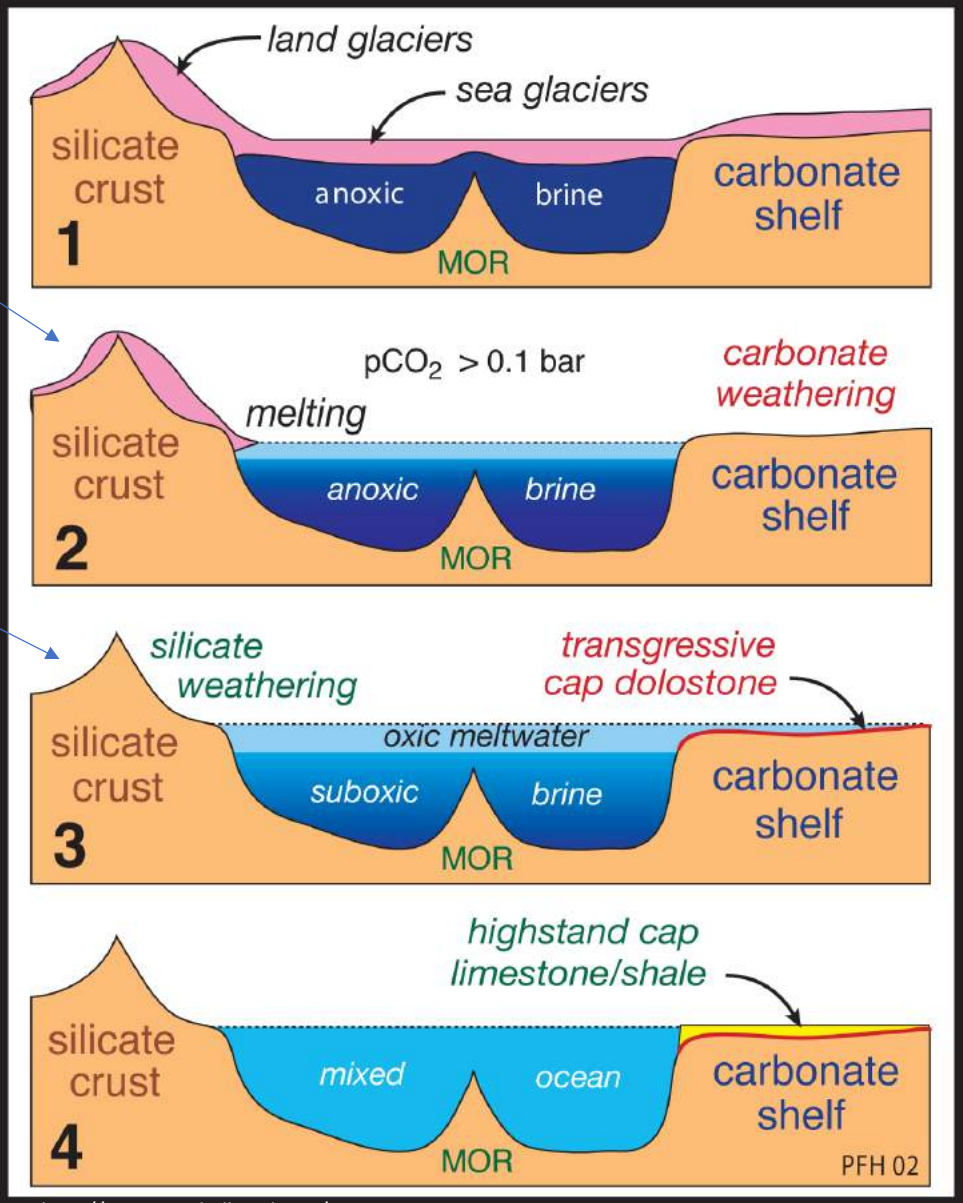


http://www.snowballearth.org/s

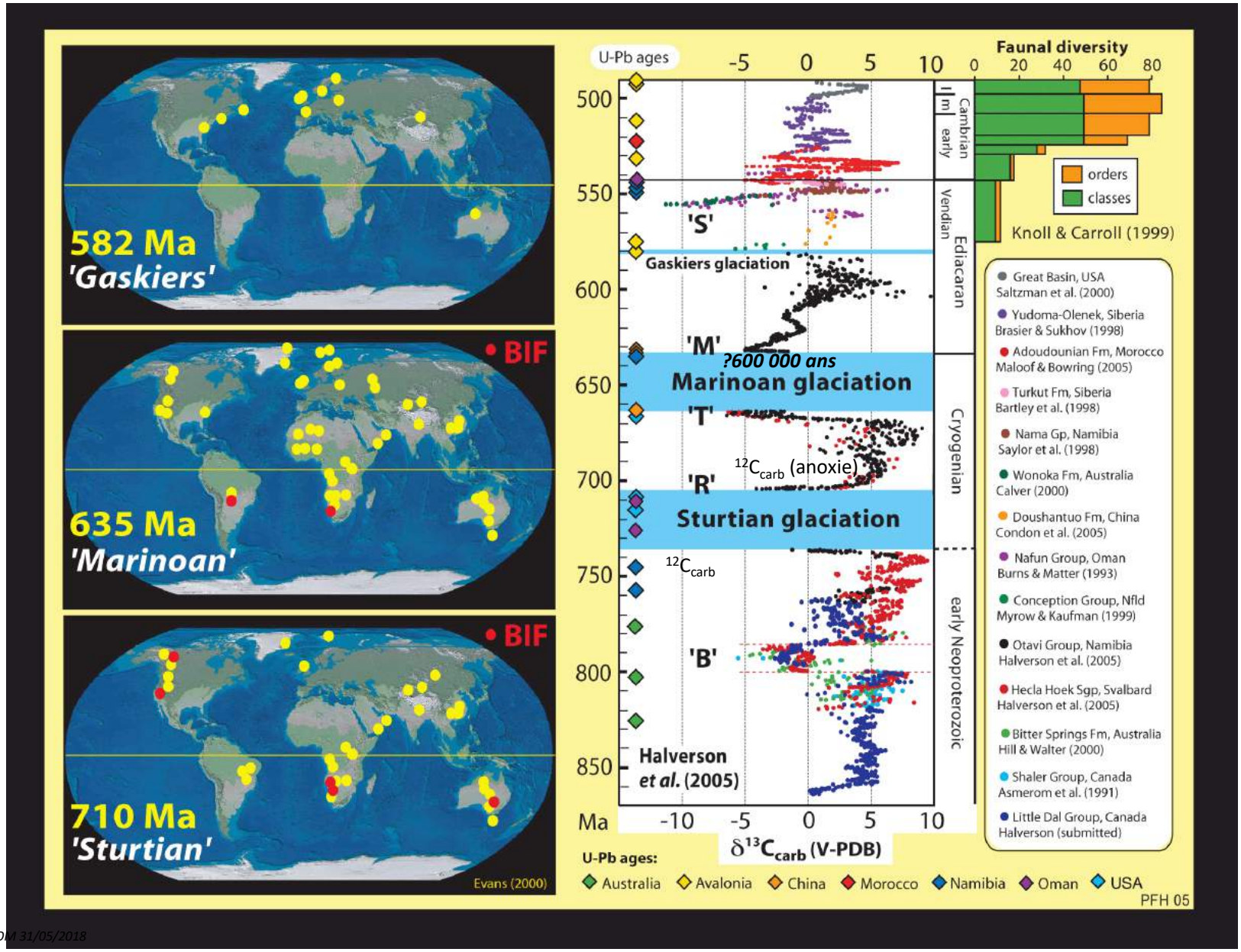


Intense warming and meltwater production results in a hyperstratified ocean during snowball earth meltdown.

Cap-carbonate sequence records shelf flooding and breakdown of chemical and density hyper-stratification.



http://www.snowballearth.org/s


582 Ma
'Gaskiers'
635 Ma
'Marinoan'
710 Ma
'Sturtian'
• BIF
• BIF
Evans (2000)
U-Pb ages
Faunal diversity
orders
classes
Knoll & Carroll (1999)
Cambrian
early
Ediacaran
Vendian
Cryogenian
early Neoproterozoic
'S'
Gaskiers glaciation
'M'
?600 000 ans
Marinoan glaciation
'T'
'R'
$^{12}C_{carb}$ (anoxie)
Sturtian glaciation
$^{12}C_{carb}$
'B'
Halverson
et al. (2005)
Ma
$\delta^{13}C_{carb}$ (V-PDB)
Great Basin, USA
Saltzman et al. (2000)
Yudoma-Olenek, Siberia
Brasier & Sukhov (1998)
Adoudounian Fm, Morocco
Maloof & Bowring (2005)
Turkut Fm, Siberia
Bartley et al. (1998)
Nama Gp, Namibia
Saylor et al. (1998)
Wonoka Fm, Australia
Calver (2000)
Doushantuo Fm, China
Condon et al. (2005)
Nafun Group, Oman
Burns & Matter (1993)
Conception Group, Nfld
Myrow & Kaufman (1999)
Otavi Group, Namibia
Halverson et al. (2005)
Hecla Hoek Sgp, Svalbard
Halverson et al. (2005)
Bitter Springs Fm, Australia
Hill & Walter (2000)
Shaler Group, Canada
Asmerom et al. (1991)
Little Dal Group, Canada
Halverson (submitted)
U-Pb ages:
Australia
Avalonia
China
Morocco
Namibia
Oman
USA
PFH 05

QUALITATIF

CO2

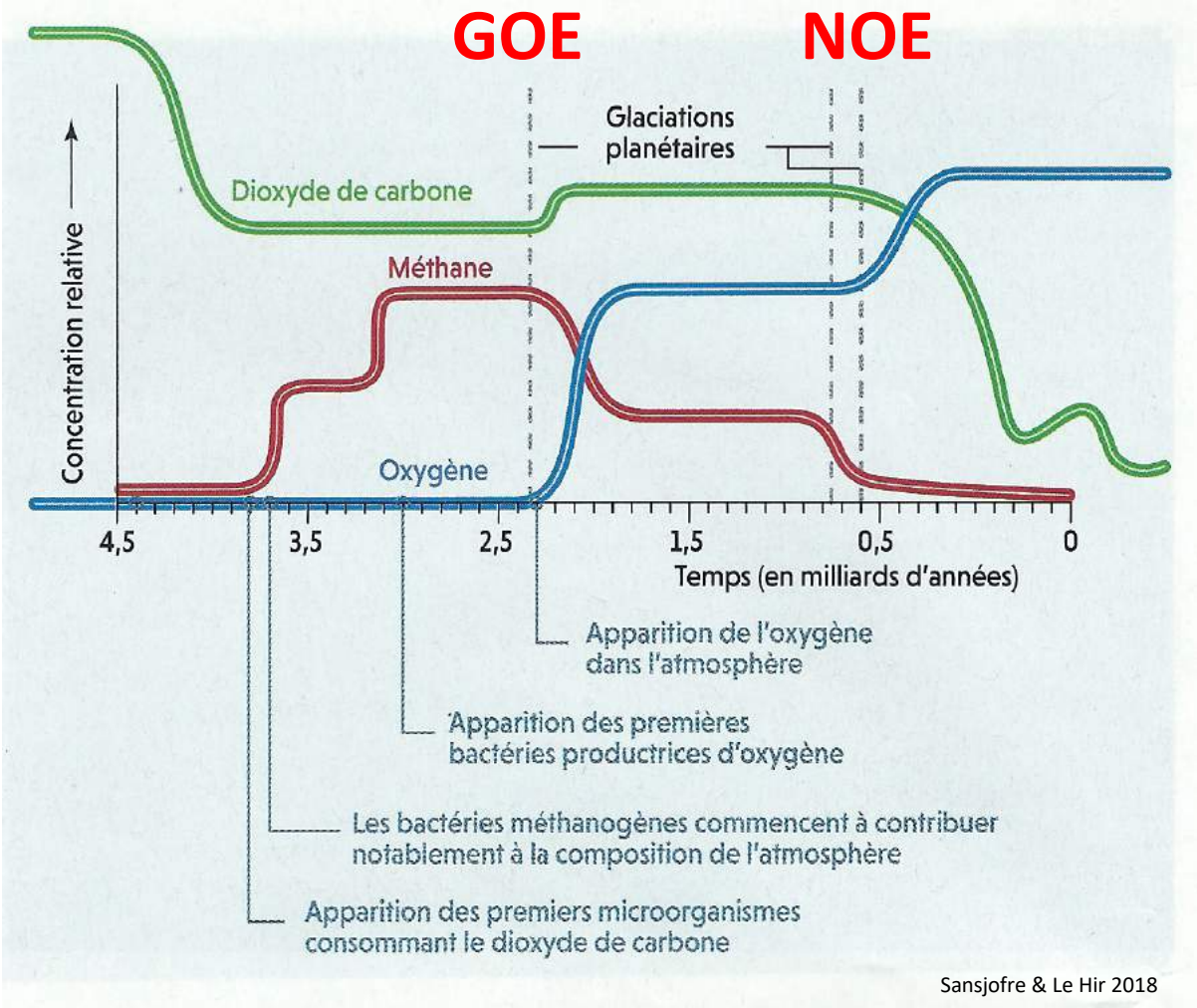
CH4

O2

+

SO4

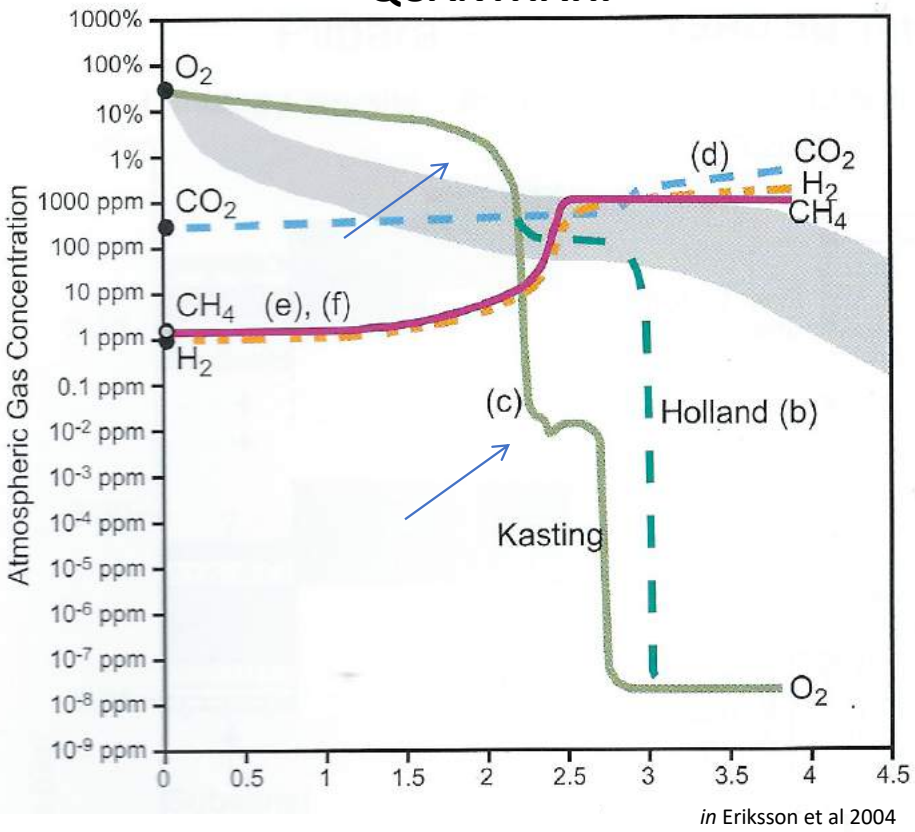
(H2)



Sansjofre & Le Hir 2018

Avant l'émergence de la Vie: l'O_2 atm = photo-dissociation de H_2O, CO_2, CO, SO_2 (volcaniques)
=> c. ?10^{-3} O_2atm -> Emergence Vie (i) biosynthèse 'ponds' et/ou (ii) hydrothermalisme…

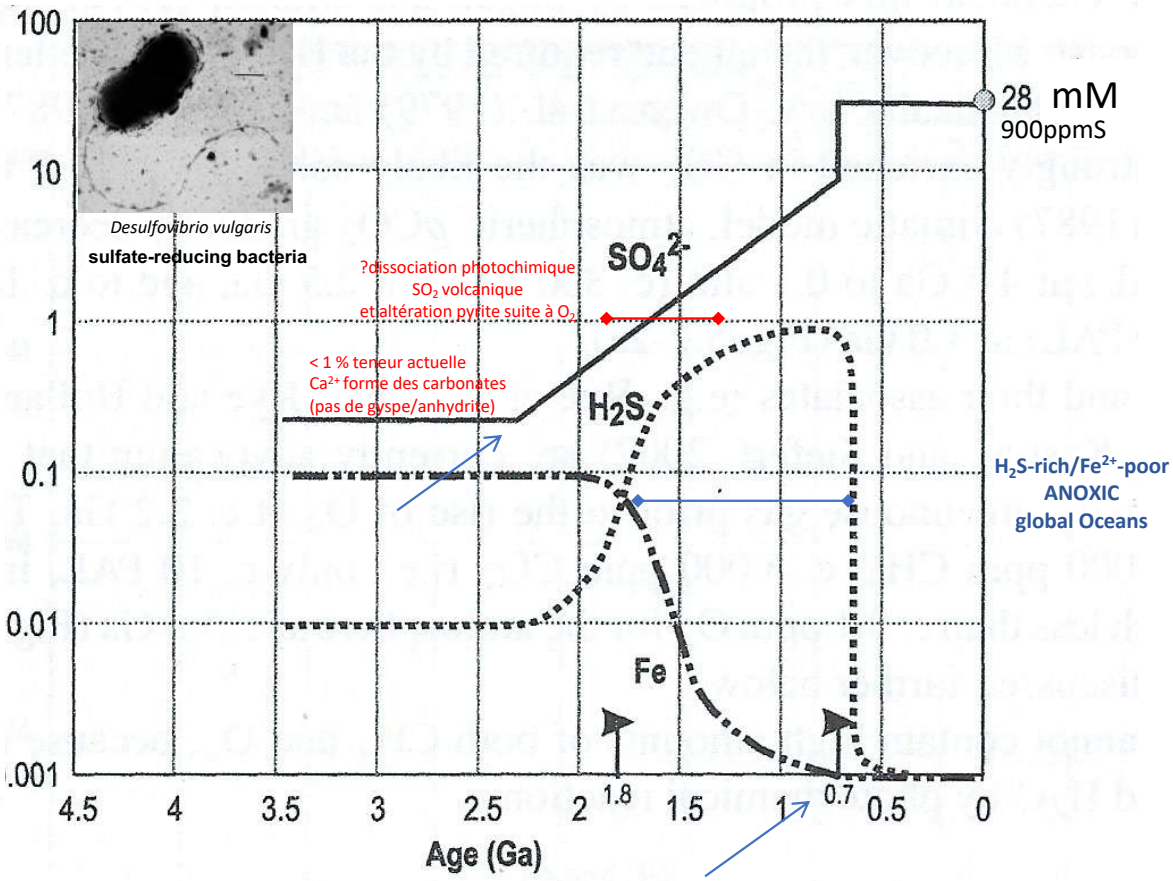
QUANTITATIF



in Eriksson et al 2004

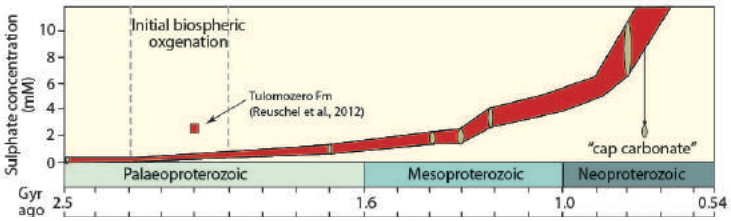
QUANTITATIF

mM Sea water Sulphide and Sulphate Concentrations



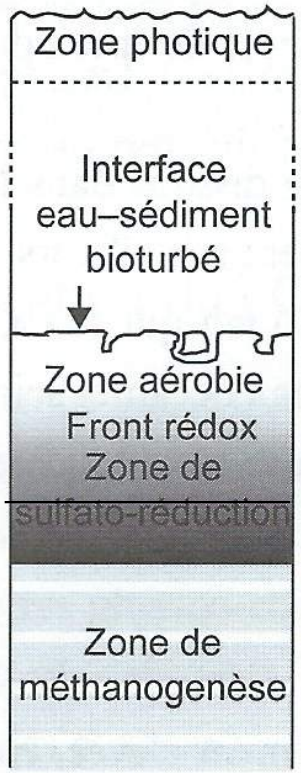
Lorsque pO_2 < 0,5 PAL => eaux de bassin = ANOXIQUES
Contenu en sulfures = f(pO_2 et SRB)
$SO_4+2H_2S+Fe^{2+} = FeS_2+2H_2O+O_2$

RPD

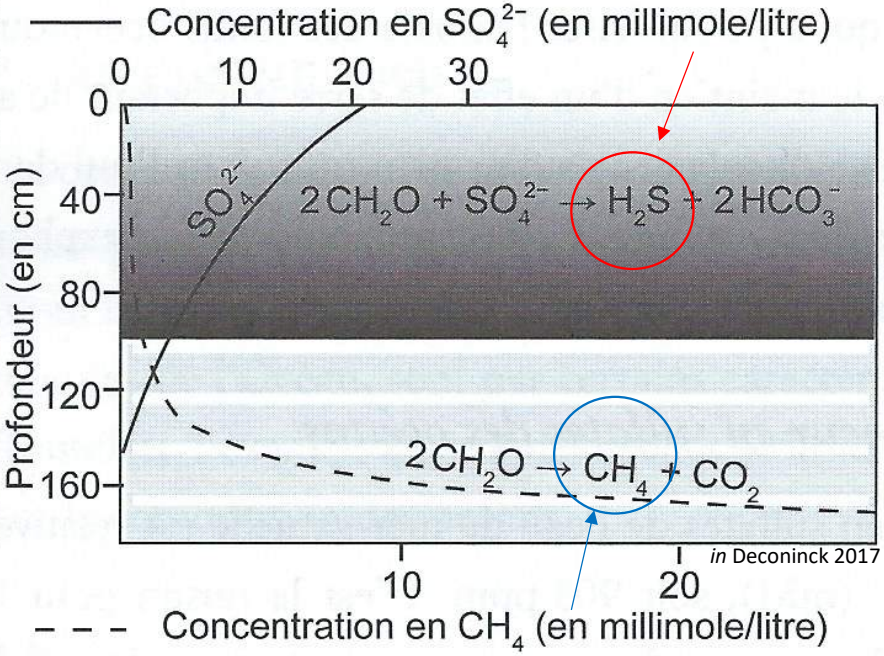


Kah et al 2004

=> 28mM/l



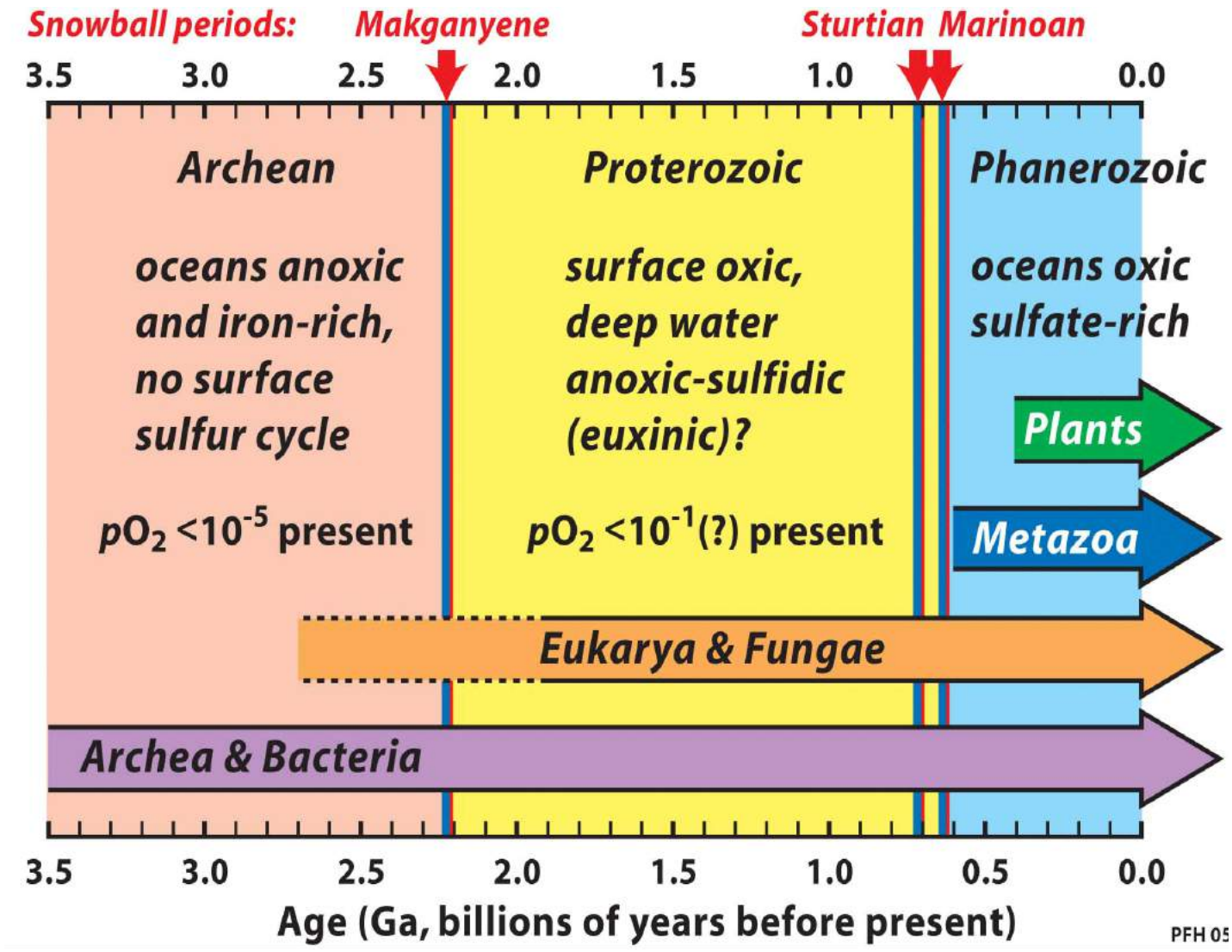
RPD



in Deconinck 2017

Situation au MésoProtérozoïque
BSR dominante => H_2S => pyrite

Situation à l'Archéen
$[SO_4^{2-}] < 1\%$ Actuel
=> méthanogenèse dominante

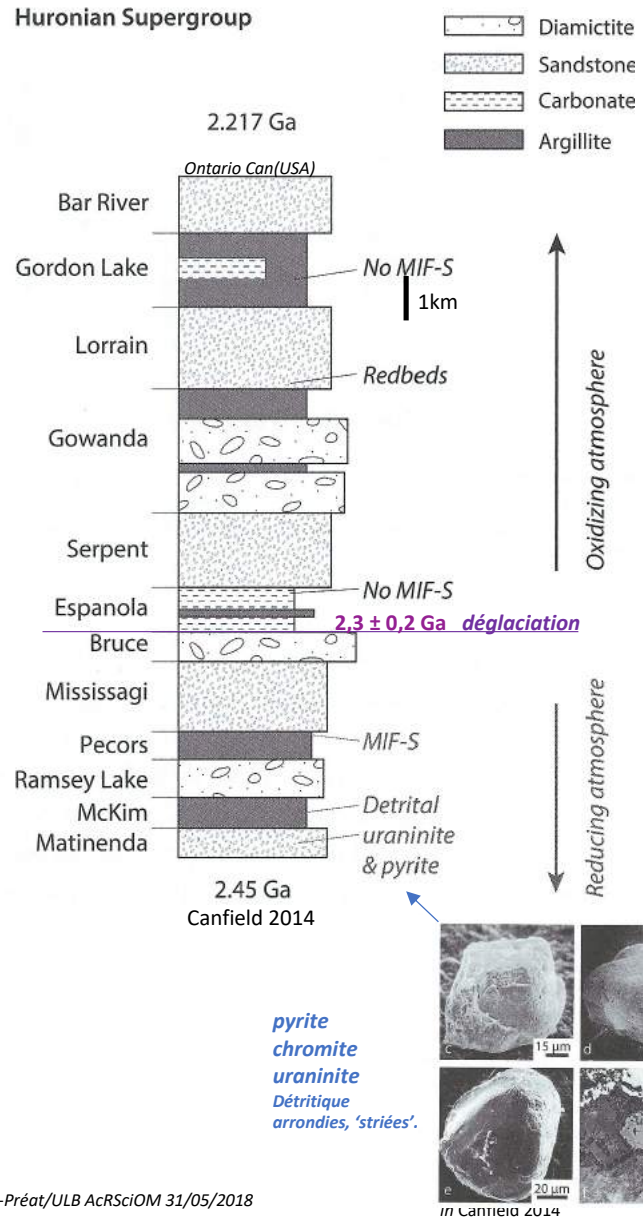


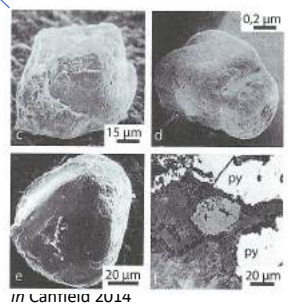
http://www.snowballearth.org/s

EVENEMENT LOMAGUNDI-JATULI

Excursion la plus importante des temps géologiques
Durée ? entre 128 ±9,4 et 249 ±9 Ma [K/J…]

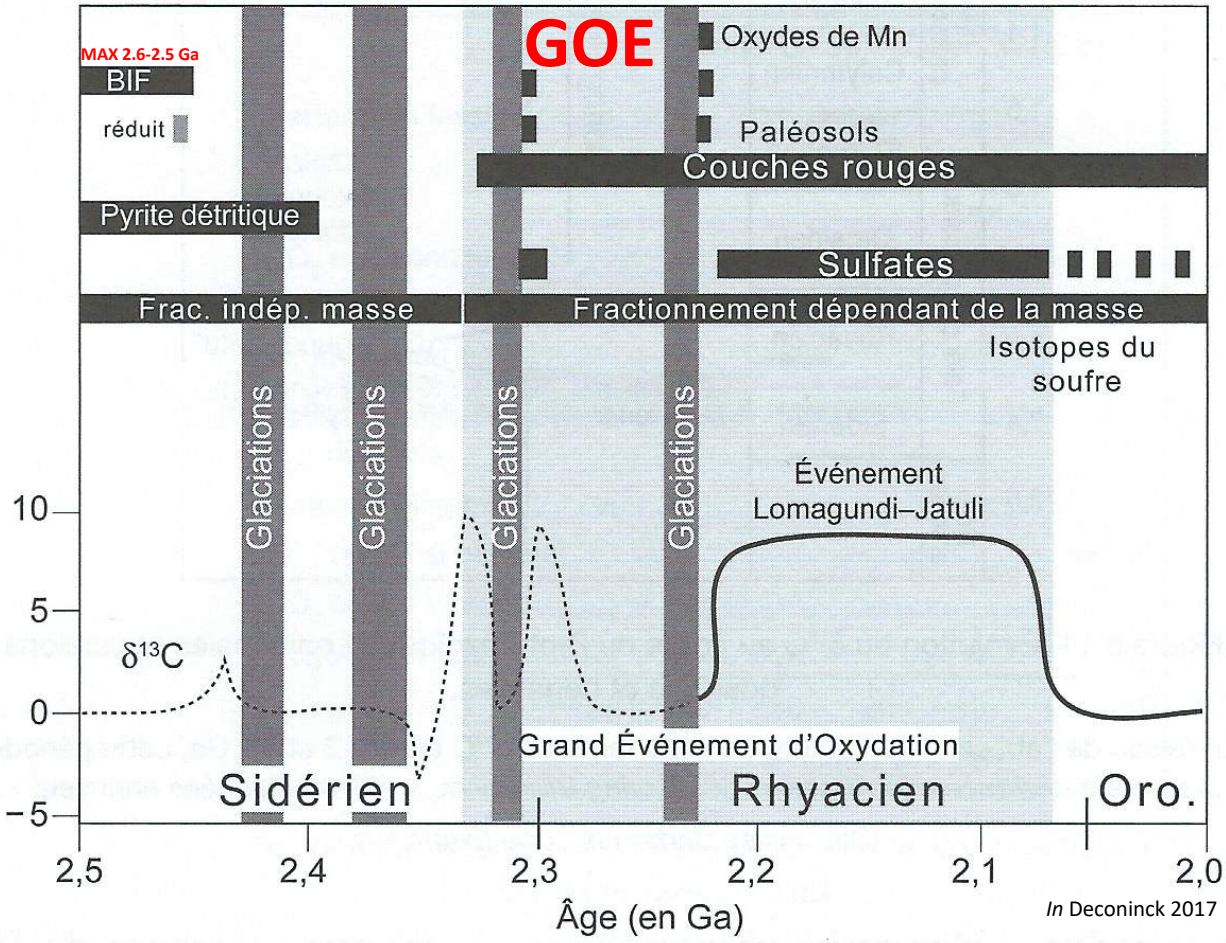
$pO_2 \leq 1\%PAL$ atm réductrice *$pO_2 \geq 15\%PAL$ atm oxydante*



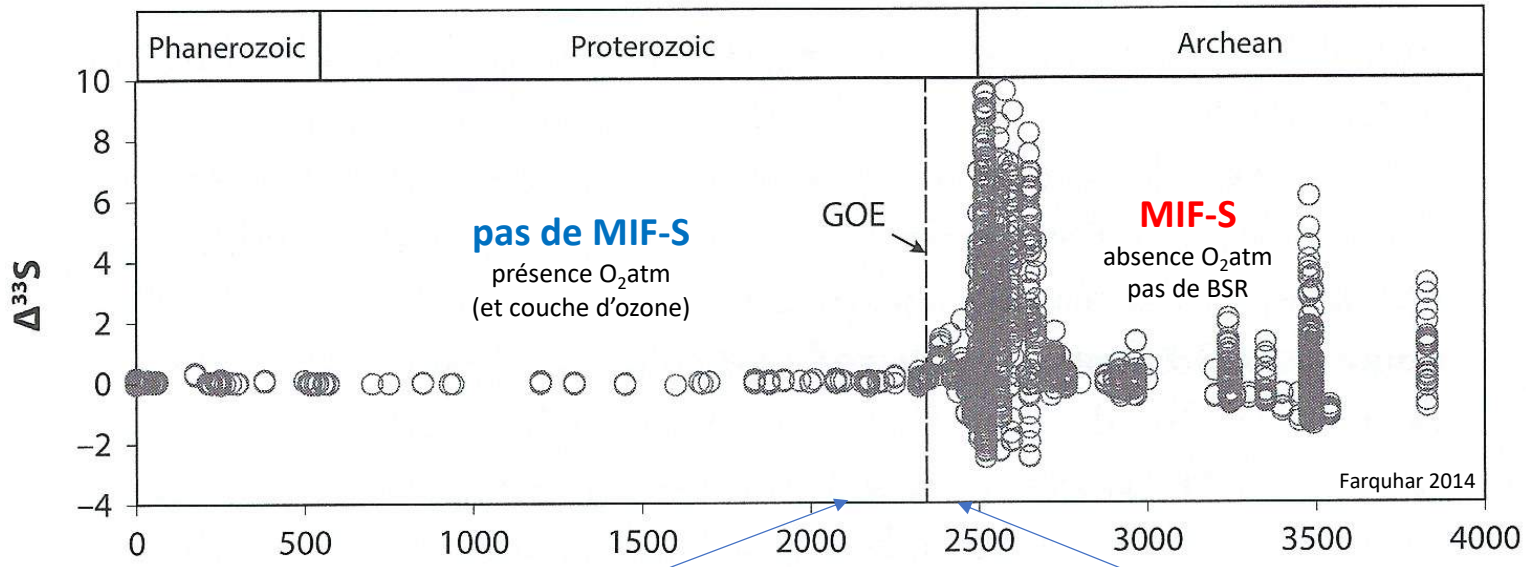


pyrite
chromite
uraninite
Détritique arrondies, 'striées'.

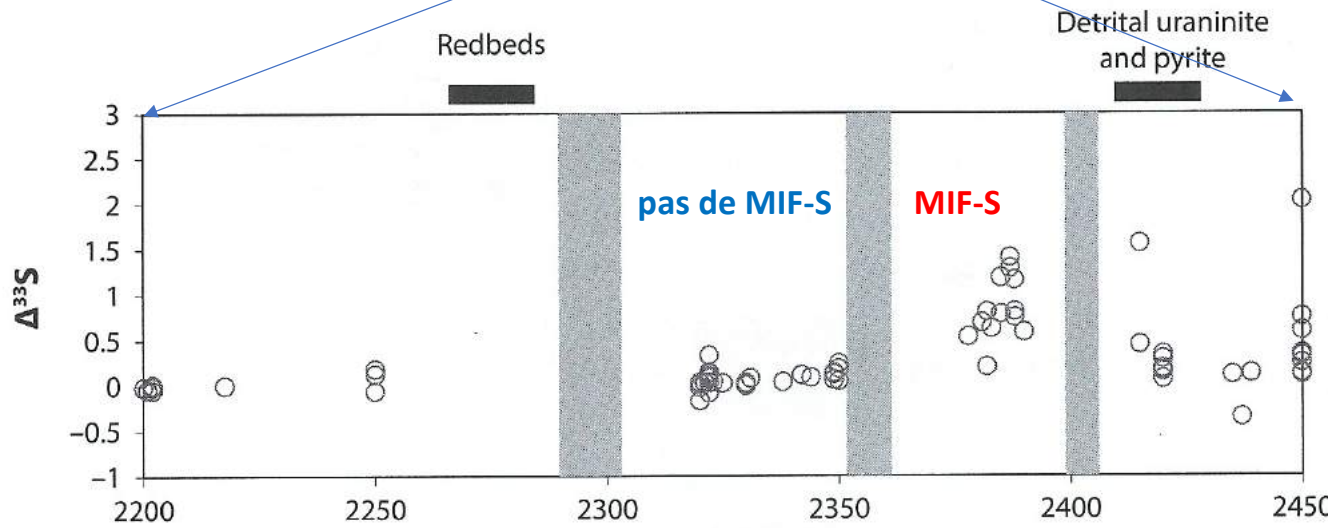
in Canfield 2014



In Deconinck 2017



^{32}S 95,02%
^{33}S 0,02%
^{34}S 4,21%
^{36}S 0,75%

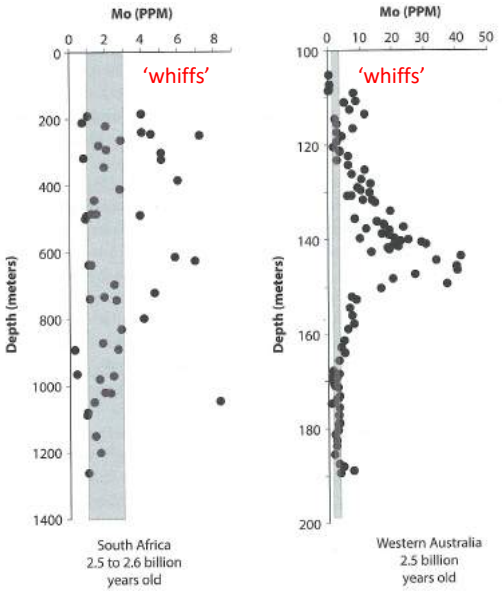


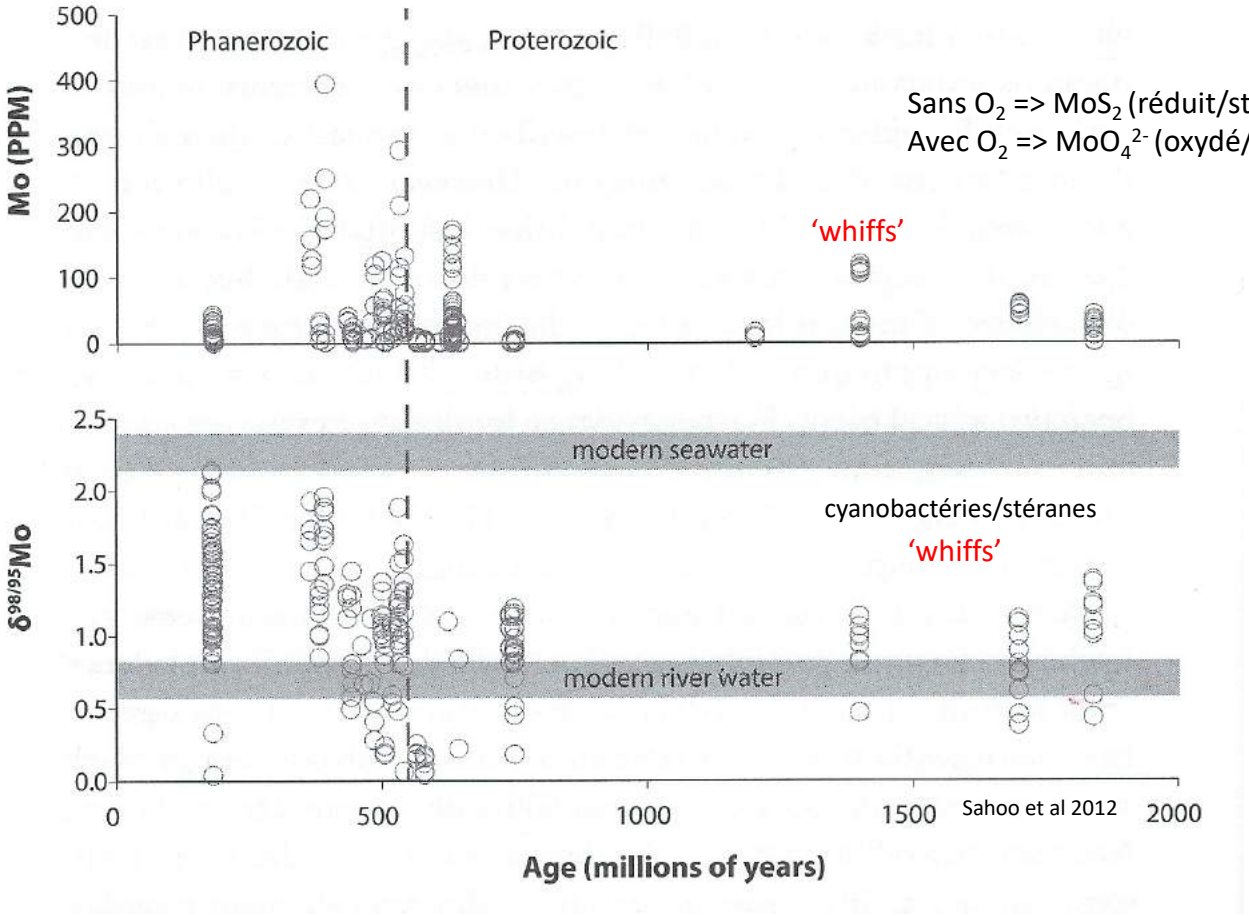
ARCHEEN
SO_2+(H_2) volcanique
Interaction avec UV
= photodissociation
SANS OZONE
car MIF-S
Uniquement dans atmosphère réductrice avec O_2 < 0,001% PAL
(100000x < qu'actuellement)
=> Mécanisme extra-atmosphérique

Egalement teneurs (ppm), isotopes (‰), Mo [^{98}/^{95}], Re, Os [^{187}/^{188}], U, Cr …. 'redox-sensitive'
Ex : Sans O_2 => MoS_2 (réduit/stable => dans roches), Avec O_2 => MoO_4^{2-} (oxydé/mobile) => rivières/océans)

MOLYBDENE (et RHENIUM, OSMIUM, URANIUM, CHROME…)

TENEURS (ppm) et ISOTOPES (‰)

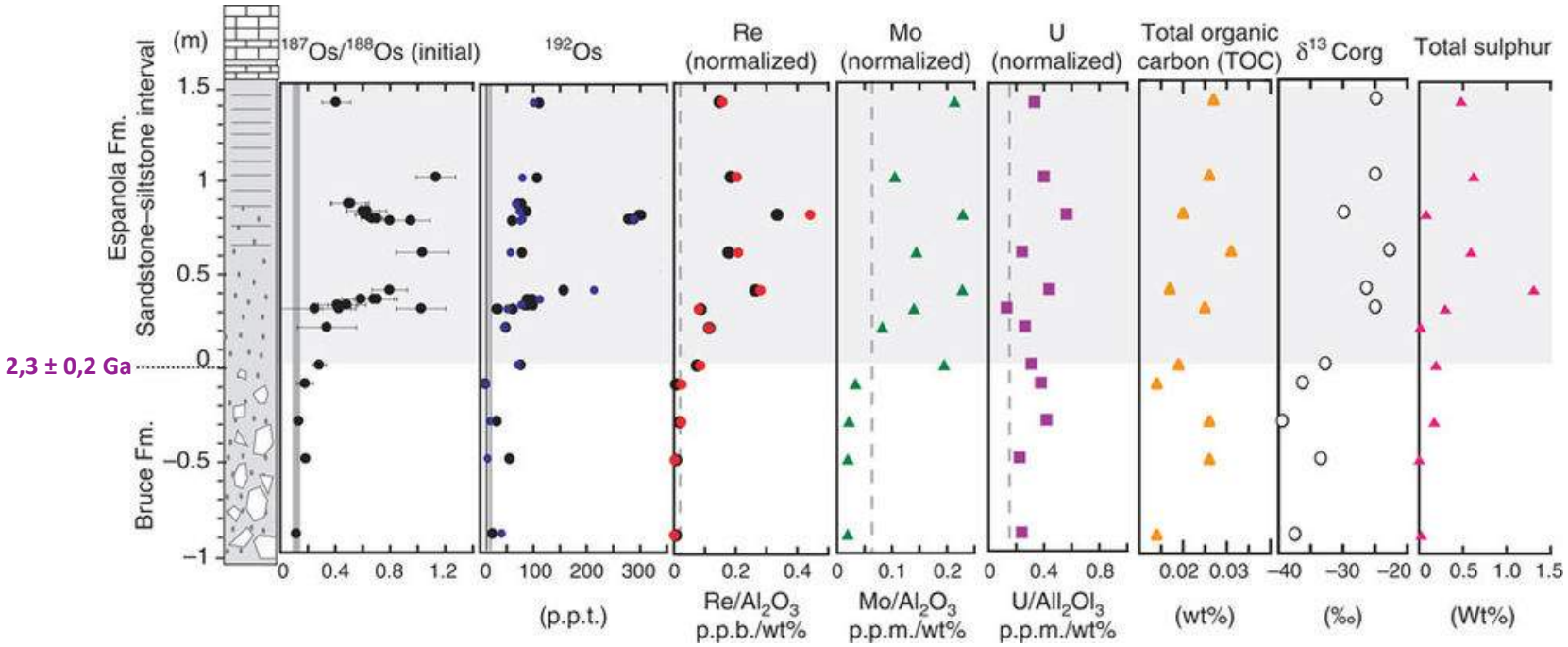


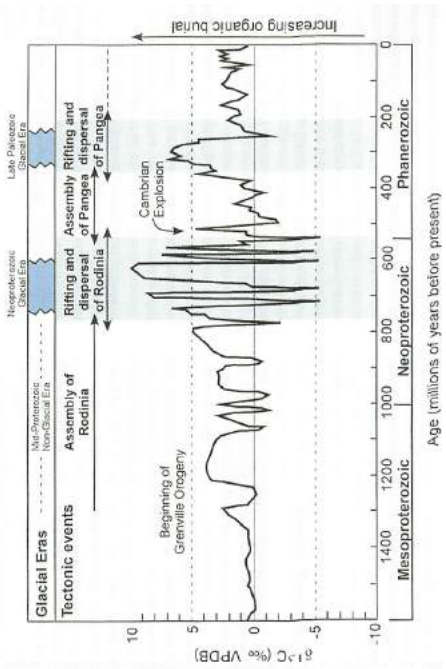


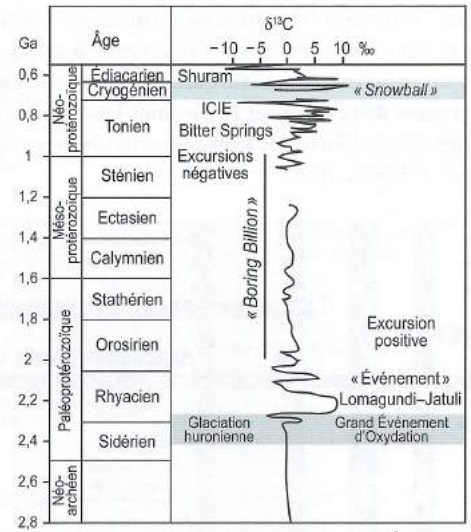
Sans O_2 => MoS_2 (réduit/stable => dans roches)
Avec O_2 => MoO_4^{2-} (oxydé/mobile) => rivières/océans)

Osmium evidence for synchronicity between a rise in atmospheric oxygen and Palaeoproterozoic

Sekine et al 2011, Nature







in Deconinck 2017

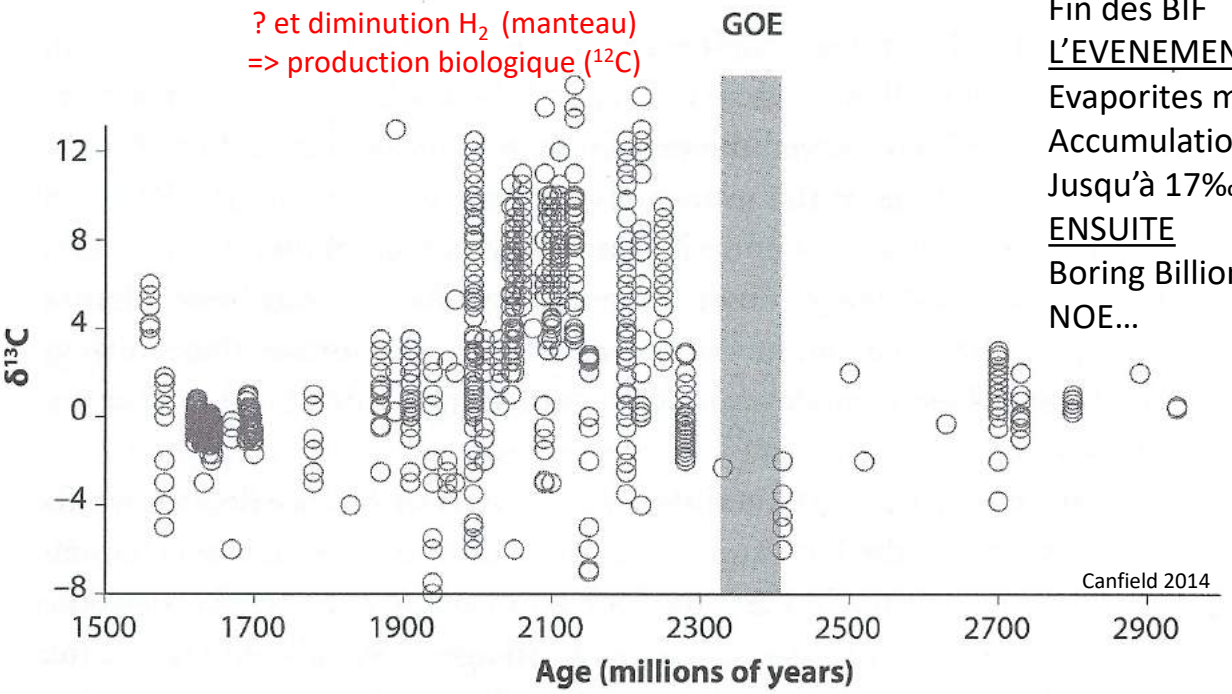
Boring billion env. 1Ga

Conséquence de l'oxygénation de l'atmosphère (GOE)
(le détail n'est pas encore compris…)

EVENEMENT LOMAGUNDI-JATULI

Excursion la plus importante des temps géologiques
Durée ? entre 128 ±9,4 et 249 ±9 Ma [K/J…mésoz]

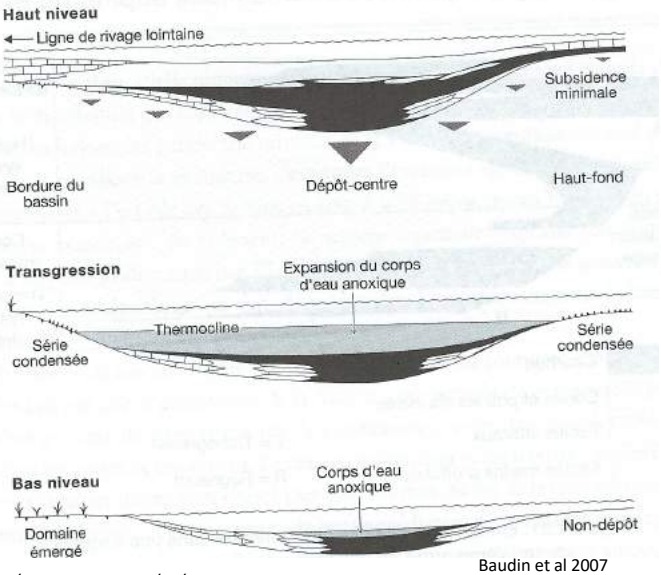
stockage de MO (flux de C = 3XPhanérozoïque)
(anoxies, Black Shales)
? et diminution H_2 (manteau)
=> production biologique (^{12}C)



L'EVENEMENT suit
GOE de 200 à 300 Ma
Glaciations huroniennes
Fin des BIF
L'EVENEMENT s'accompagne
Evaporites massives (SO_4)
Accumulations de PO_4
Jusqu'à 17‰
ENSUITE
Boring Billion
NOE…

Black Shales

Préat 2007



Baudin et al 2007

Mn

Préat 2007

Événement Lomagundi–Jatuli

Excursion positive du $\delta^{13}C$

+ Tectonique (foreland basins))

Augmentation de la préservation de matière organique

Augmentation de la productivité

Augmentation du flux de phosphore dans les océans

(Également azote)

Solubilisation de l'apatite

Intensification de l'altération

Altération de la pyrite

H_2SO_4

Acidification des sols et eaux souterraines

oxydation

Oxygénation de l'atmosphère

Deconinck 2017

Préat 2007

Mn

PALEOPROTEROZOÏQUE 2,5-1,6

17 réacteurs nucléaires Oklo (2,0 Ga)
pendant 100 000-500 000 ans
sur une durée de 1 Ma
Rendements modestes 100kW (<1000x)

?Premiers Eucaryotes (Nature 2010)

Gisement de Mn (Moanda)
25% res.mondiales = 70 années de prod.
2è producteur africain (1=Afr S)

<u>Anomalie de Lomagundi ($^{13}C/^{12}C$)</u>

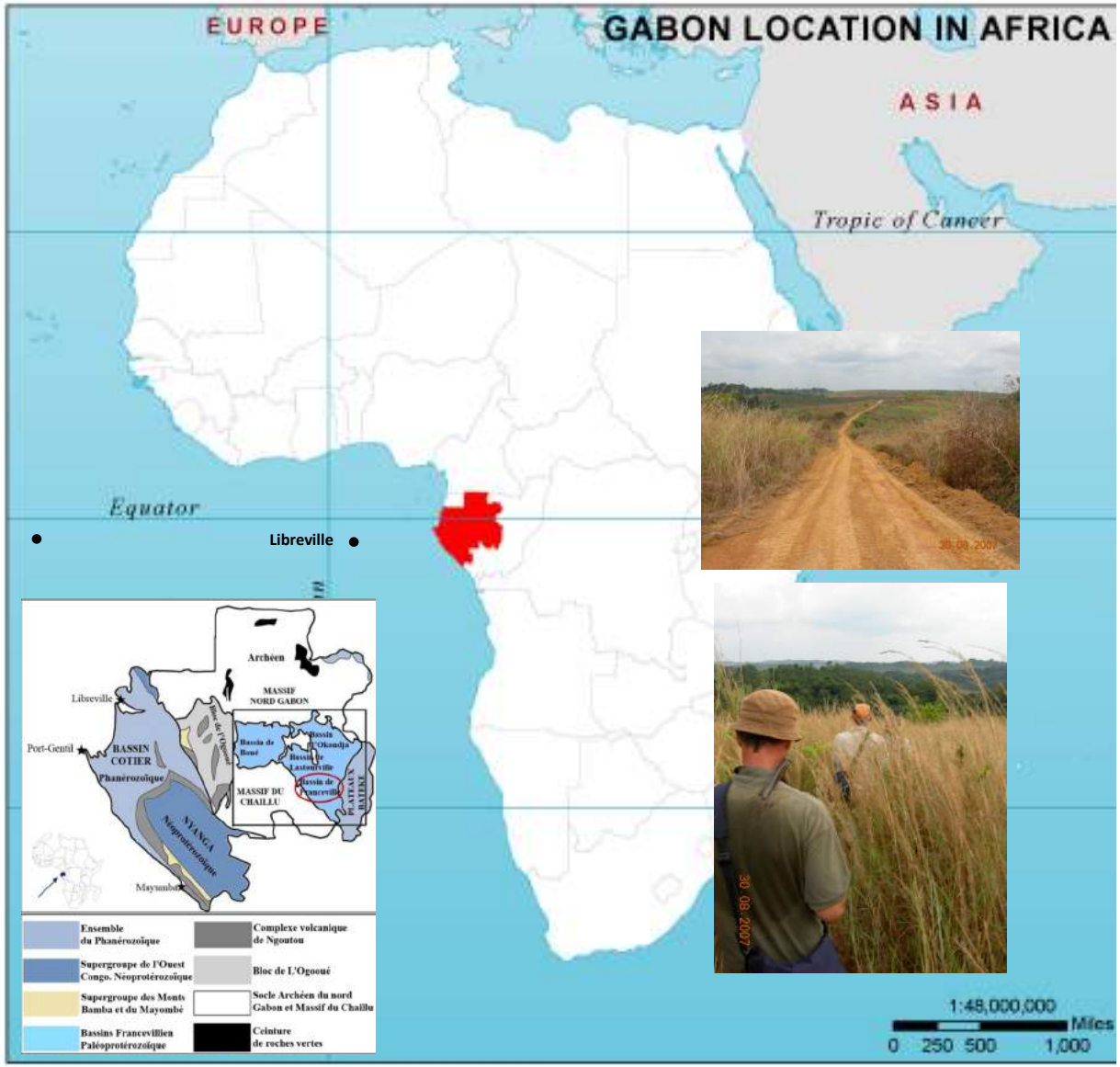
<u>Bassins euxiniques et oxiques</u>

Glaciations (huroniennes)

BIF (Banded Iron Formation)

<u>GOE (Great Oxidation Event)</u>

(NEOPROTEROZOÏQUE 1,0-0,541)



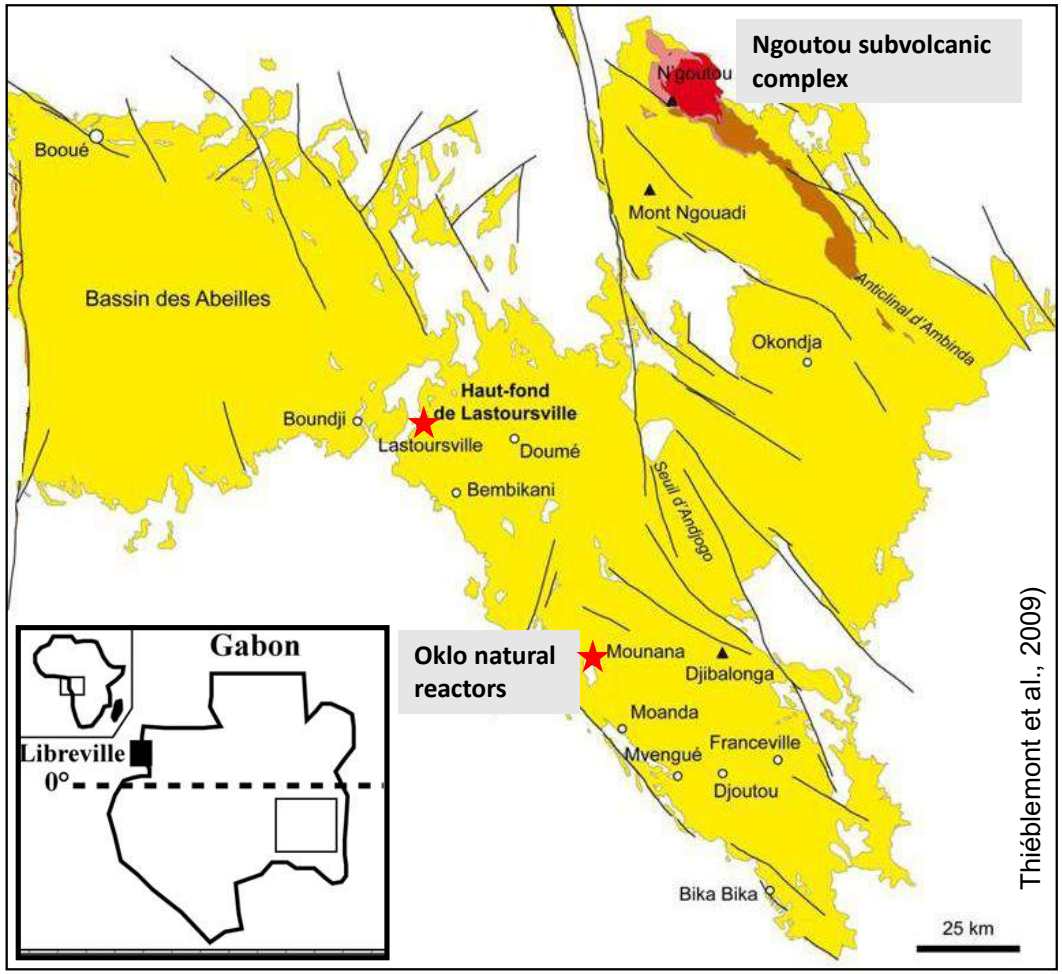
A-Préat/ULB AcRSciOM 31/05/2018

The Francevillian basin

- 35 000 km² area
within the Congo Craton (Archean)

- 4 sub-basins
  Franceville
  Latoursville
  Okondja
  Booué

- Five stratigraphic units (PPz)
  from fluviodeltaic to marine
  sedimentation (Weber 1969)



Francevillian lithostratigraphic column and associated ages

DETRITIQUE/VOLCANISME

U-Pb 2083 ± 6 Ma (Horie et al 2005)

STROMATOLITES/CHERTS

BLACK SHALES ET DOLOMIES

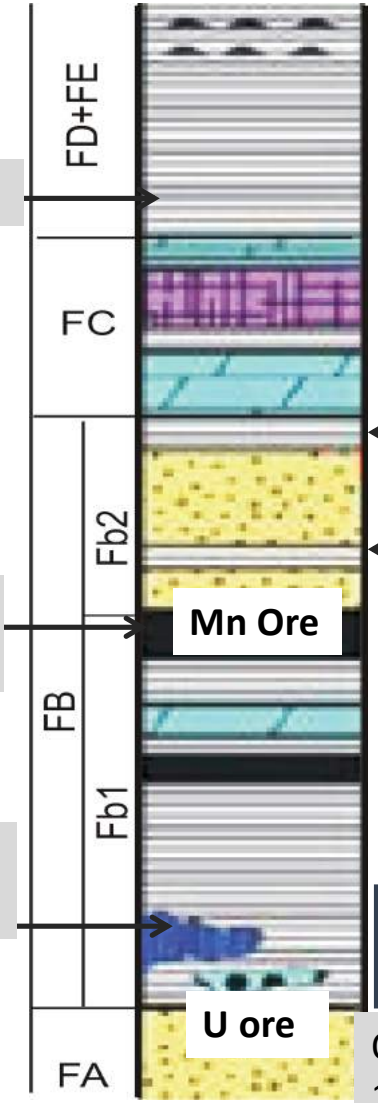
Sm-Nd 2099 ± 115 Ma (Bros et al 1992).

BLACK SHALES ET DOLOMIES

Ngoutou volcanic intrusion: $^{207}Pb/^{206}Pb$, 2191 ± 13 Ma (Sawaki et al 2016)

CONGLOMERATS/GRES

(socle Archéen du Chaillu)



Bakakas 2018

Figure 2 | Examples of black shale bedding surfaces. a, b. Bearing macrofossils in colony form from the FB2 level. Scale bars, 1.0 cm.

Large colonial organisms (Albani et al 2010)

Microbial/algal consortia (Moussavou et al 2015)

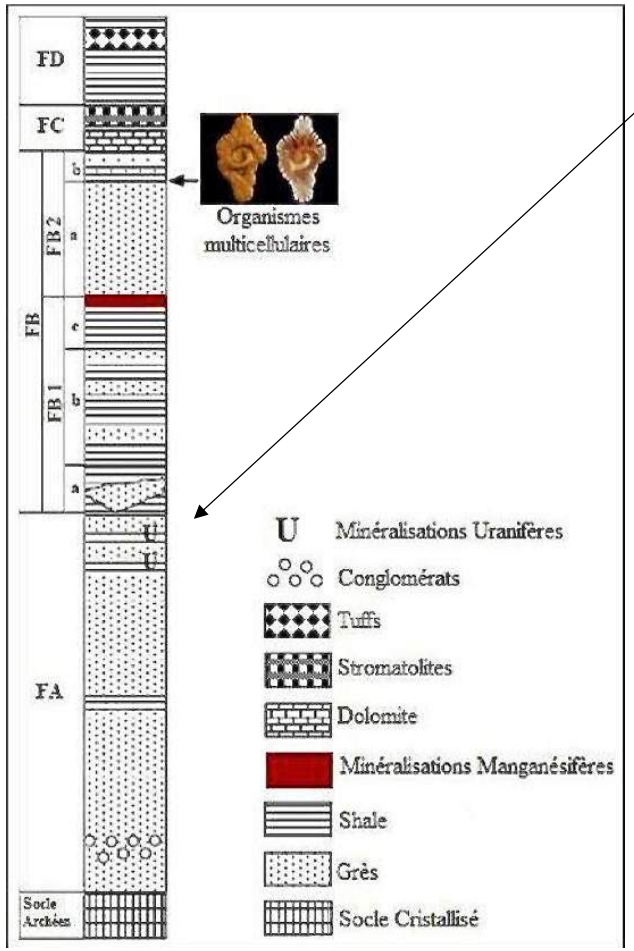
Mn Ore

Préat 2006

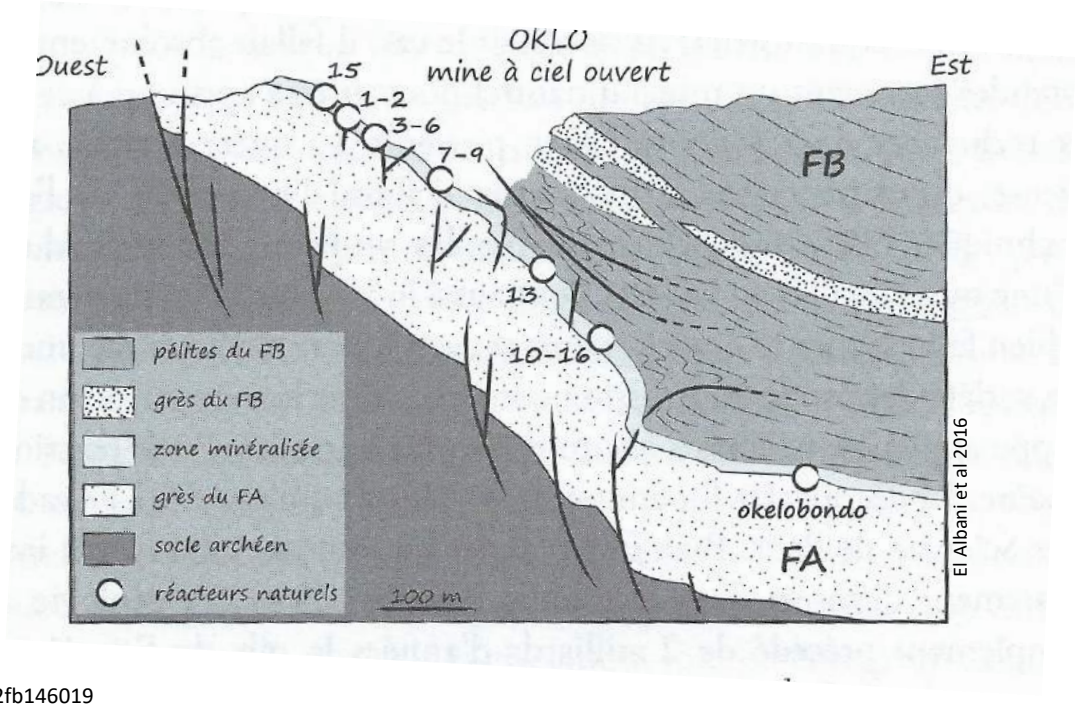
500m

Oklo natural fission reactors: 1950 ± 30 Ma (Holliger 1988)

REACTEURS NUCLEAIRES NATURELS D'OKLO 1,95 GA



Nos premiers réacteurs nucléaires datent des années 1950… et suivent de près de 2 milliards d'années les 17 « réacteurs » naturels qui ont fonctionné de manière stable pendant 100 000 à 500 000 ans sur une période d'environ un million d'années. Ils produisirent de l'énergie avec des rendements modestes (100 kilowatts en moyenne par réacteur, bien inférieurs aux réacteurs actuels produisant 1 à 1,5 gigawatt, soit au moins 1 000 fois plus).



http://nuxeo.edel.univ-poitiers.fr/nuxeo/site/esupversions/f4ba52d0-4dec-4a4c-93b4-ee32fb146019

Nos premiers réacteurs nucléaires datent des années 1950… et suivent de près de 2 milliards d'années les 17 « réacteurs » naturels qui ont fonctionné de manière stable pendant 100 000 à 500 000 ans sur une période d'environ un million d'années. Ils produisirent de l'énergie avec des rendements modestes (100 kilowatts en moyenne par réacteur, bien inférieurs aux réacteurs actuels produisant 1 à 1,5 gigawatt, soit au moins 1 000 fois plus).

https://www.notre-planete.info/actualites/4257-reacteur-nucleaire-naturel-Oklo

Ces réacteurs se sont formés entre 12 et 250 m de profondeur dans les couches gréseuses du Paléoprotérozoïque du bassin sédimentaire de Franceville au sud du Gabon à Oklo (16 réacteurs) et à 30 km au SE d'Oklo à Bangombé (un seul réacteur) suite à une série de processus géologiques aléatoires qui ont mené à un enrichissement de l'uranium. La taille de ces réacteurs est variable, le plus grand, situé à 18 m de profondeur, formant une lentille épaisse de 20 à 50 cm sur 12 m de longueur. Leur « cœur » consistait en une couche de 5 à 20 cm d'épaisseur d'uraninite (40 à 60% d'UO_2) emballée dans des argiles d'altération formées à 400° C suite à la fission nucléaire. Les produits radioactifs (plutonium, thorium, plomb…) sont pour la plupart restés à proximité des réacteurs depuis 2 milliards d'années, sans causer de dommages particuliers (l'encaissant n'a été affecté que sur quelques centimètres à quelques mètres), ce qui montrerait que le stockage géologique des déchets radioactifs est possible sur de longues périodes de temps.

http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/35/078/35078659.pdf

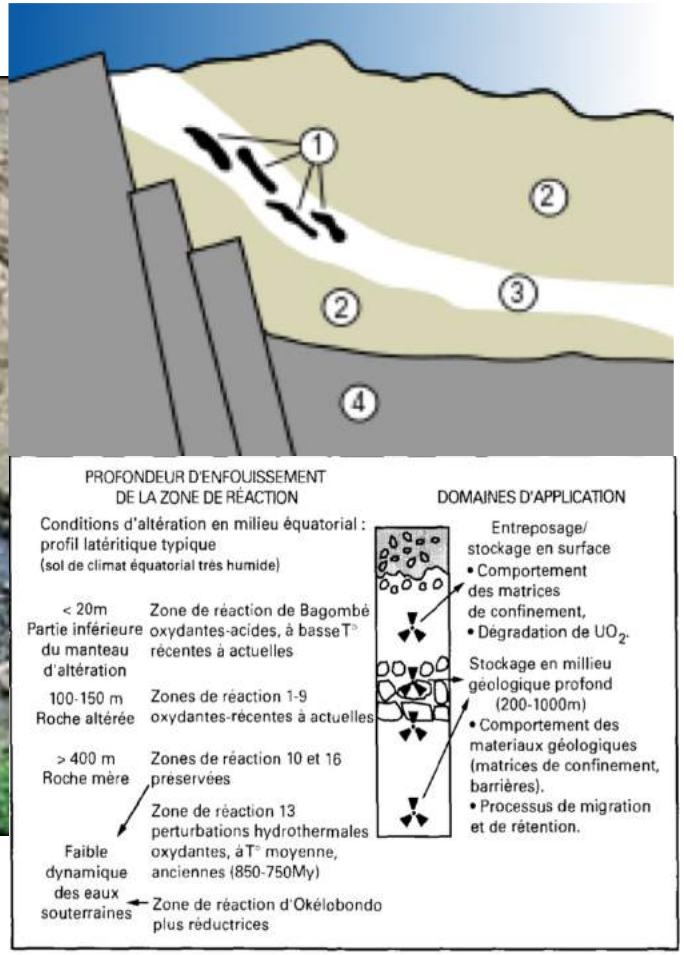
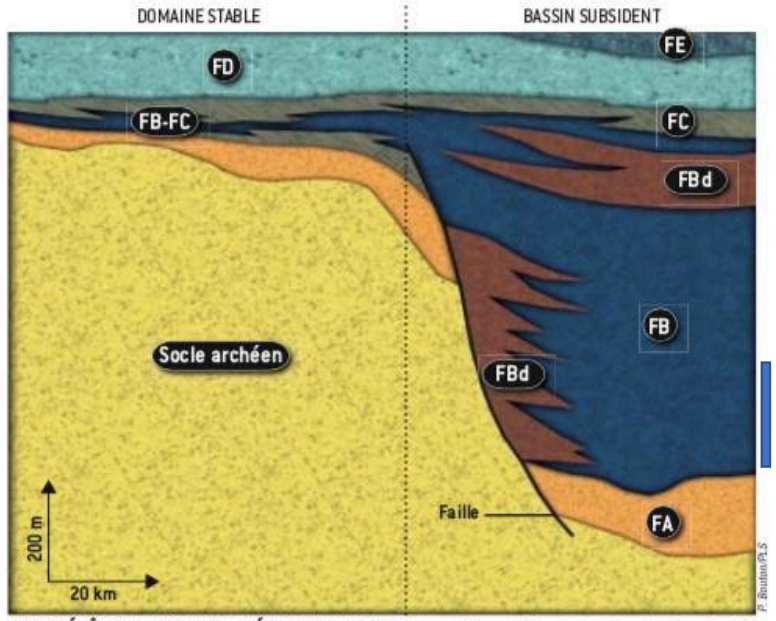
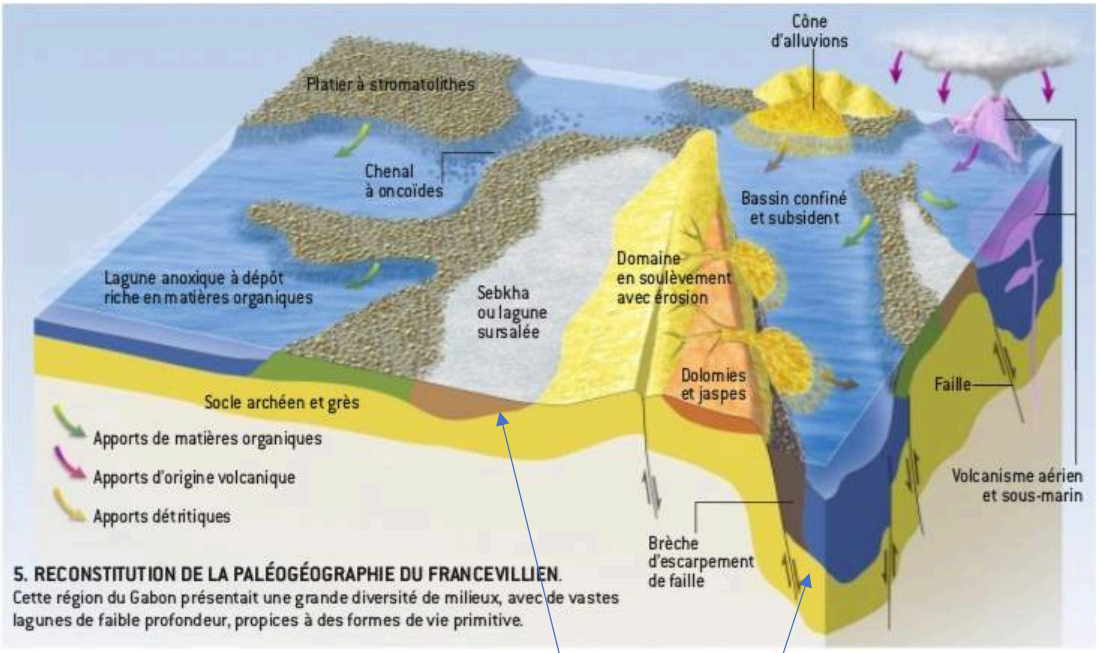


PLATE-FORME et BASSINS EUXINIQUES AU FRANCEVILLIEN c. 2.1 Ga (GABON)



4. LE DÉPÔT DE LA COUCHE SÉDIMENTAIRE du Francevillien A (FA, couche de grès) a précédé un phénomène tectonique qui a formé des fossés d'effondrement (ou de subsidence). L'accumulation de sédiments (FB : argilites riches en matière organique ; FBd : produits détritiques issus de l'érosion des marges des bassins et du volcanisme) a été plus abondante dans ces bassins, jusqu'à ce que la subsidence cesse. Ensuite, les dépôts se sont uniformisés (couches supérieures ; FC : dolomies et jaspes ; FD : grès et pélites ; FE : grès).

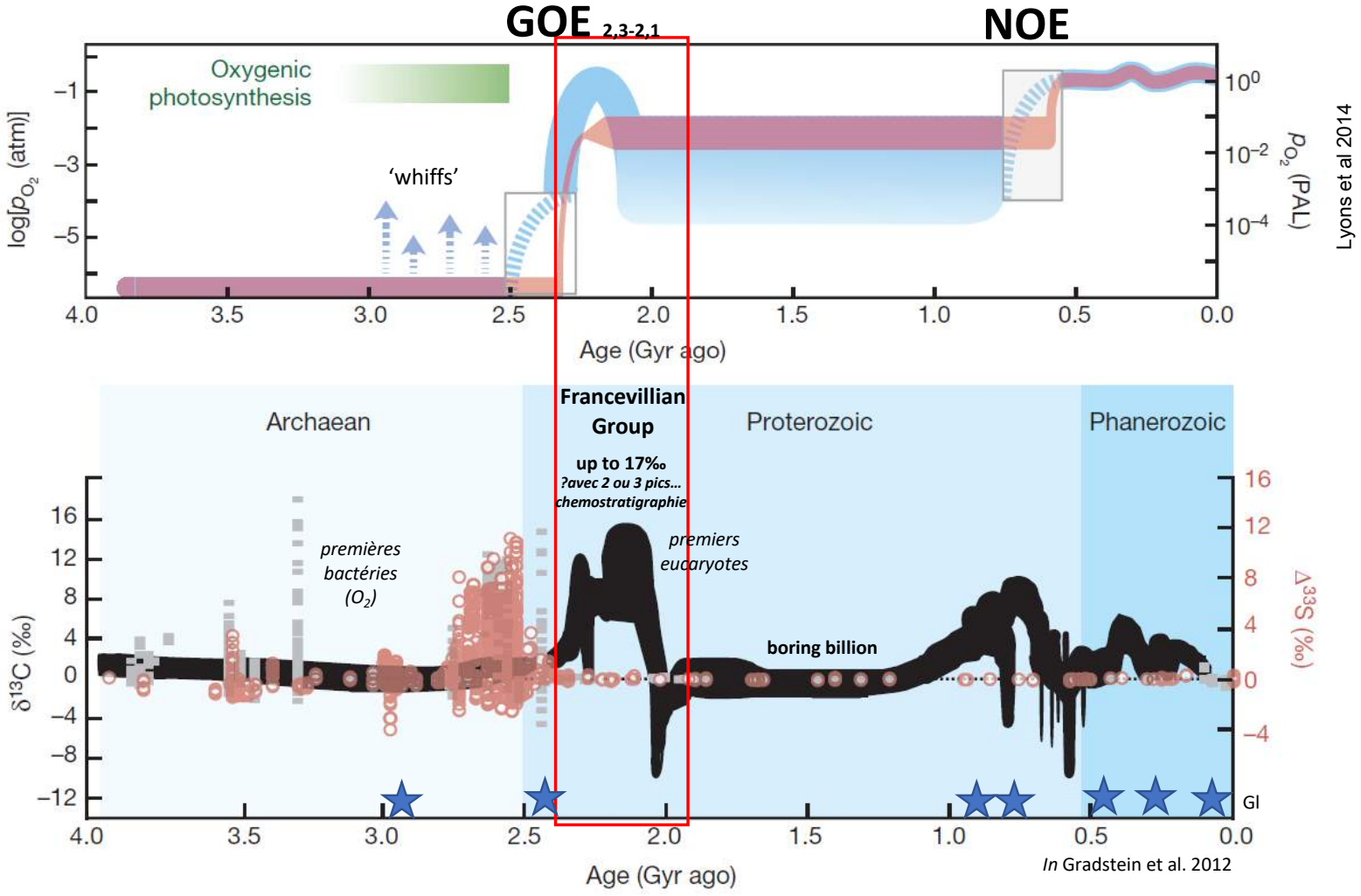


5. RECONSTITUTION DE LA PALÉOGÉOGRAPHIE DU FRANCEVILLIEN. Cette région du Gabon présentait une grande diversité de milieux, avec de vastes lagunes de faible profondeur, propices à des formes de vie primitive.

Bouton et al. 2012

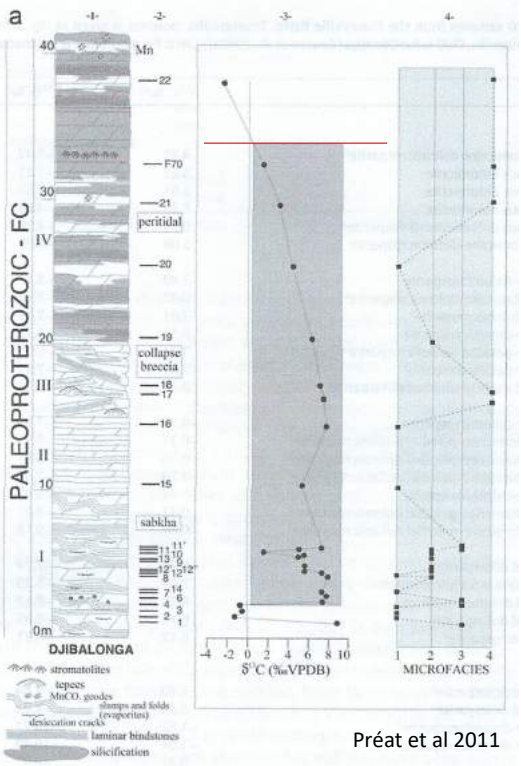
Préat 2007

‘Lomagundi excursion’ : 10 à 20x plus d’O_2 soit 1 à 10% valeur actuelle

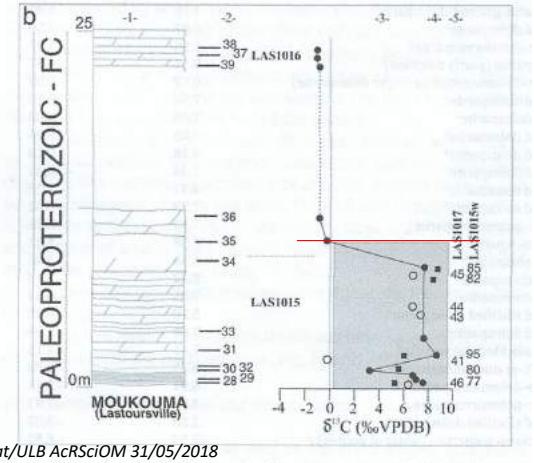


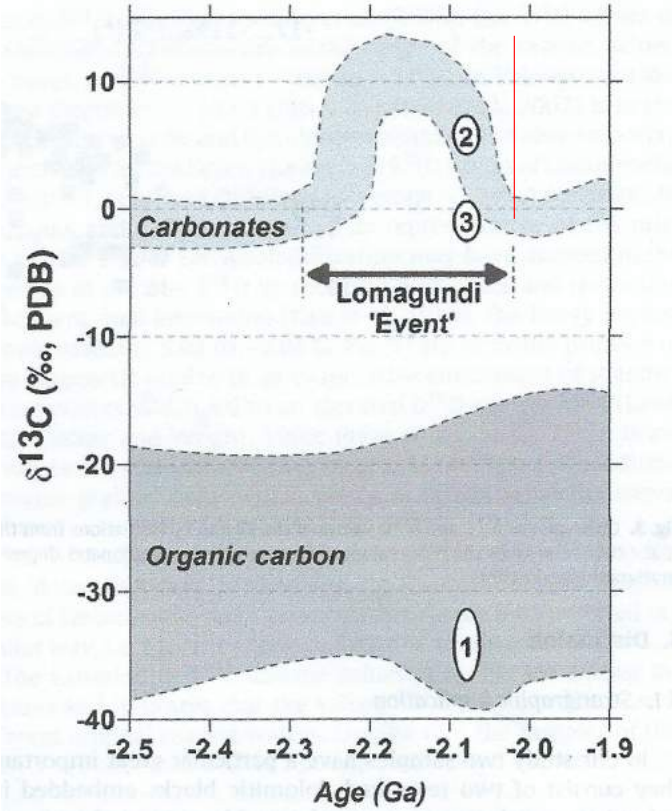
Lyons et al 2014

In Gradstein et al. 2012

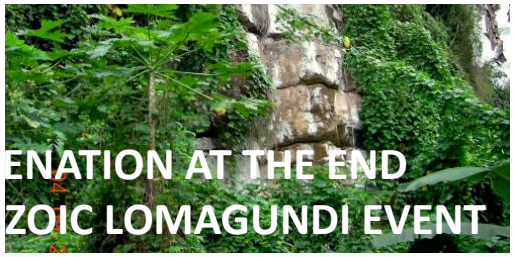


Préat et al 2011





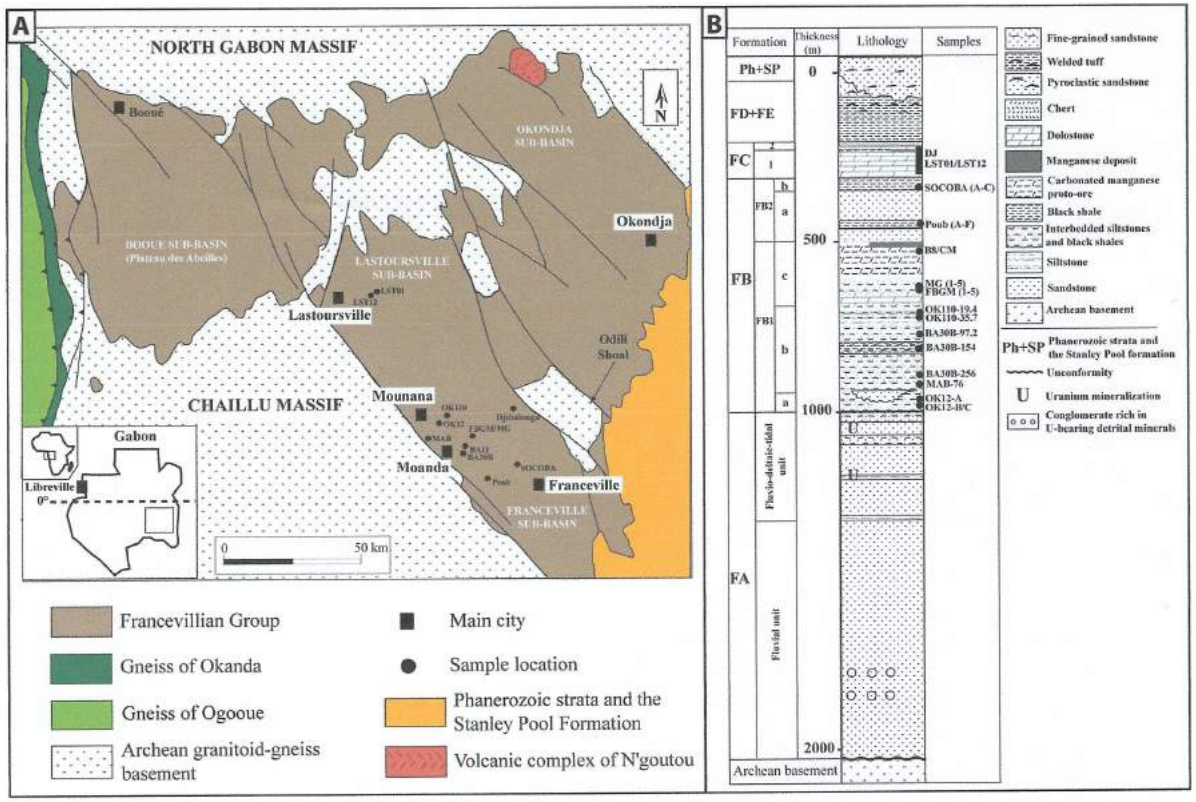
Falaise de Lastourville, Préat 2007



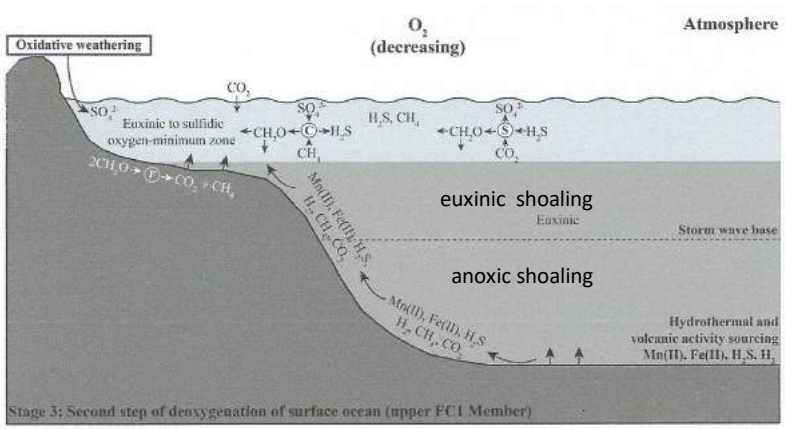
TWO-STEP DEOXYGENATION AT THE END OF THE PALEOPROTEROZOIC LOMAGUNDI EVENT

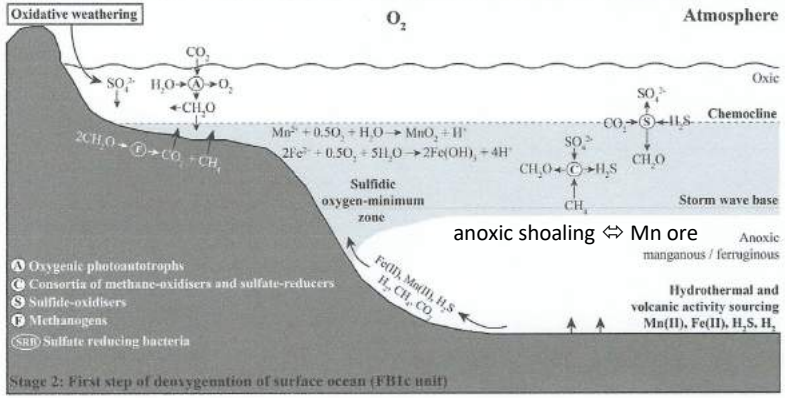
Table 1
Geochemical data for black shales and carbonates of the Francevillian Group. Samples LST, OK110, and BA30B are from drill cores. Depth in drill cores (in meters) defines the name of the sample. The rest of samples are from outcrops.

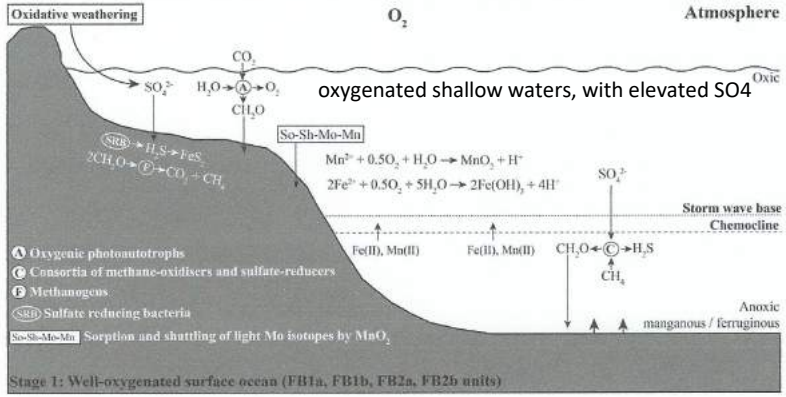
Stratigraphic subdivision	Samples	$\delta^{34}S$ (‰, VCDT)	$\Delta^{33}S$ (‰, VCDT)	$\Delta^{36}S$ (‰, VCDT)	$\delta^{98}Mo$ (‰, NIST3134)	$\delta^{13}C_{org}$ (‰, VPDB)	$\delta^{13}C_{carb}$ (‰, VPDB)	$\delta^{18}O$ (‰, VPDB)	Mo (ppm)	TOC (wt.%)	TS (wt.%)	Fe (wt.%)	Mn (wt.%)



Ossa Ossa et al 2018







2083 ⇧

SWB Turbidites

...

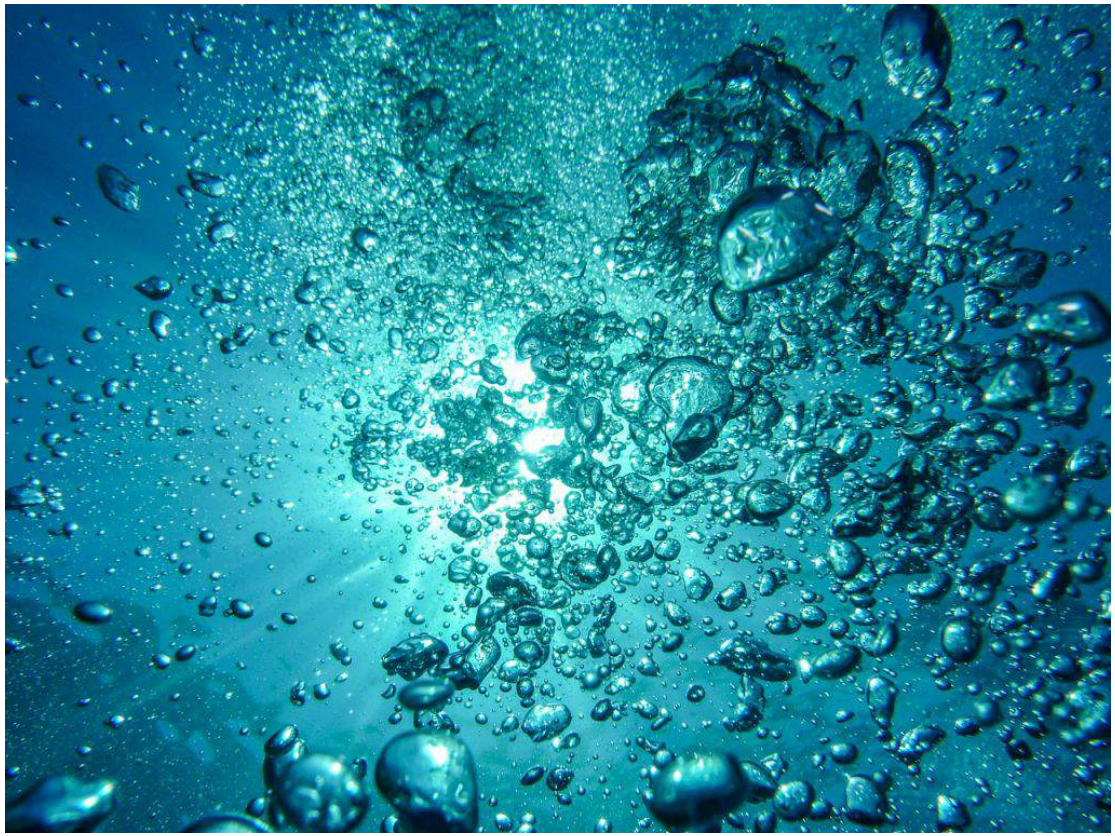
...

2191

A-Préat/ULB AcRSciOM 31/05/2018

L'oxygène : un poison pendant plusieurs milliards d'années...

https://www.notre-planete.info/actualites/4467-oxygene-poison-vie



Credit : Martin Str/ Pixabay – Licence : CCO

'Lomagundi excursion' : 10 à 20x plus d'O_2 soit 1 à 10% valeur actuelle

$CO_2 + H_2O = CH_2O_{org} + O_2$ **(1)** => **actuelle** PAL $3{,}8 \times 10^{19}$moles O_2 [a] = 0.21atm organismes O-photosynthétiques/ **6cm d'ép. si liquéfié**)
production actuelle : 14×10^{15}moles ou? $8{,}8 \times 10^{15}$ O_2/an [b]

$2CH_2O_{org} \rightarrow CO_2 + CH_4$ **(2)** = altération MO …-> ac. org … -> consommés par organismes hétérotrophiques (anaérobes)
et fermentation microbienne => méthane biogénique $\delta^{13}C$ ‰ << MO (cyanobactéries)

$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ **(3)** = oxydation par les bactéries méthanotrophes (aérobes)
(**auj** CH_4 : 3×10^{13}moles/an **-> 0,2% de la 'nouvelle' MO est décomposée en CO_2 et H_2O** par (3)

$CH_2O_{org} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ **(1') = [2 +3]** => 1 mole d'O_2 est nécessaire pour décomposer 1 mole MO
O_2 est renouvelé tous les 3000 ans [a/b] par les processus biologiques (ou 4200 ans/autres auteurs) = court terme

=> pour accumuler O_2 atm (long terme > 3000 à 4200 ans), il faut qu'une (faible) fraction de MO [1] soit ENFOUIE dans les sédiments échappant ainsi à l'oxydation [1'] => la production long terme de flux d'O_2 = le taux d'enfouissement du C_{org}

⇒ **auj: 0,14% MO océanique est enfouie donnant un flux de C_{org} de 10^{13}moles/an => le temps de résidence de l'O_2 atm long terme est de 4 Ma (**$3{,}8 \times 10^{19}$moles O_2 /10^{13}moles/an **)**

⇒ Consommation long terme O_2 **: oxydation gaz volc réduits** (H_2, H_2S, CH_4, CO…) c. $0{,}25 \times 10^{13}$moles/an
oxydation $C_{fossile}$ (kérogène, RS=> 'sols')c. $0{,}75 \times 10^{13}$moles/an = **idem flux de C_{org} de 10^{13}moles/an**

il y a donc équilibre actuellement entre la consommation et production long terme de l' O_{2atm}

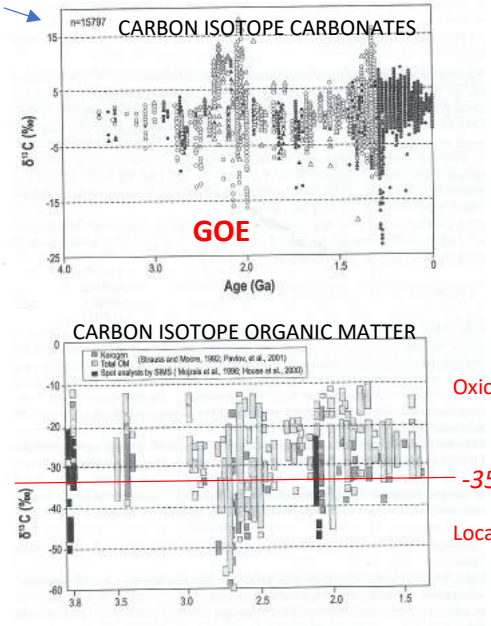
Quid dans le passé?

$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ **(4)** L'atmosphère ne peut contenir de fortes concentrations **A LA FOIS** de CH_4 et O_2 car dissociation photochimique => aussi fonction production biologique…
Archéen: pas d'O_2 => CH_4 > CH_4 actuel

$CO_2 + 2H_2 = CH_2O_{org} + H_2O$ **(5)** => Finalement les producteurs primaires dominants dans l'océan **avant** 2,8 Ga étaient les méthanogènes utilisant directement CO_2 et H_2 **(5)** pour produire **CH4** **(6)**.
MO avec $\delta^{13}C_{org}$ > -35‰ à -60 ‰

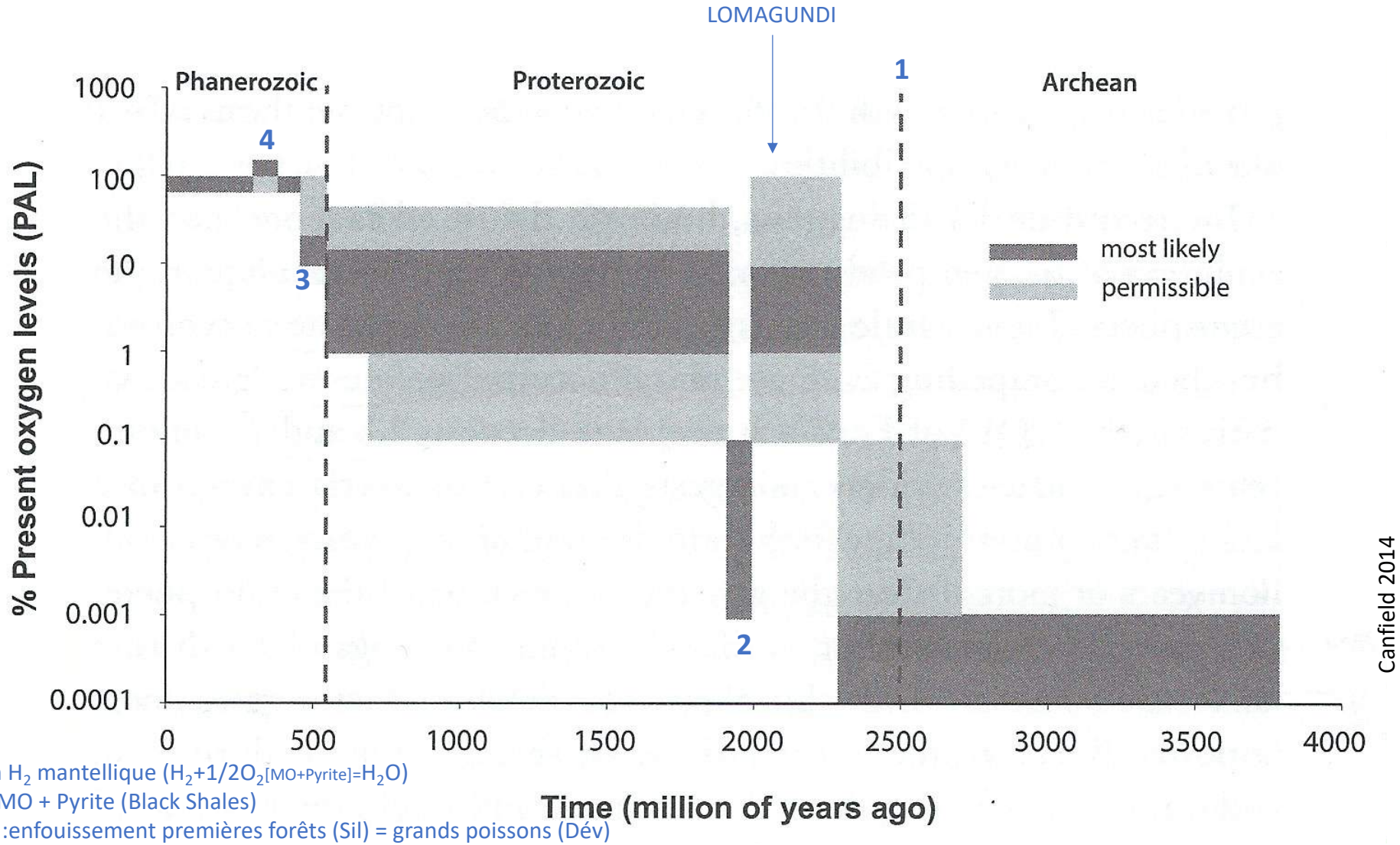
$CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 2H_2O$ **(6)**

Conclusion : à 2,8 Ga (O_2 est produit par cyanobactéries) => et production de MO avec $\delta^{13}C_{org}$ < -35‰ par les méthanotrophes dans océans stratifies **(3')**



Oxic/dysoxic/anoxic

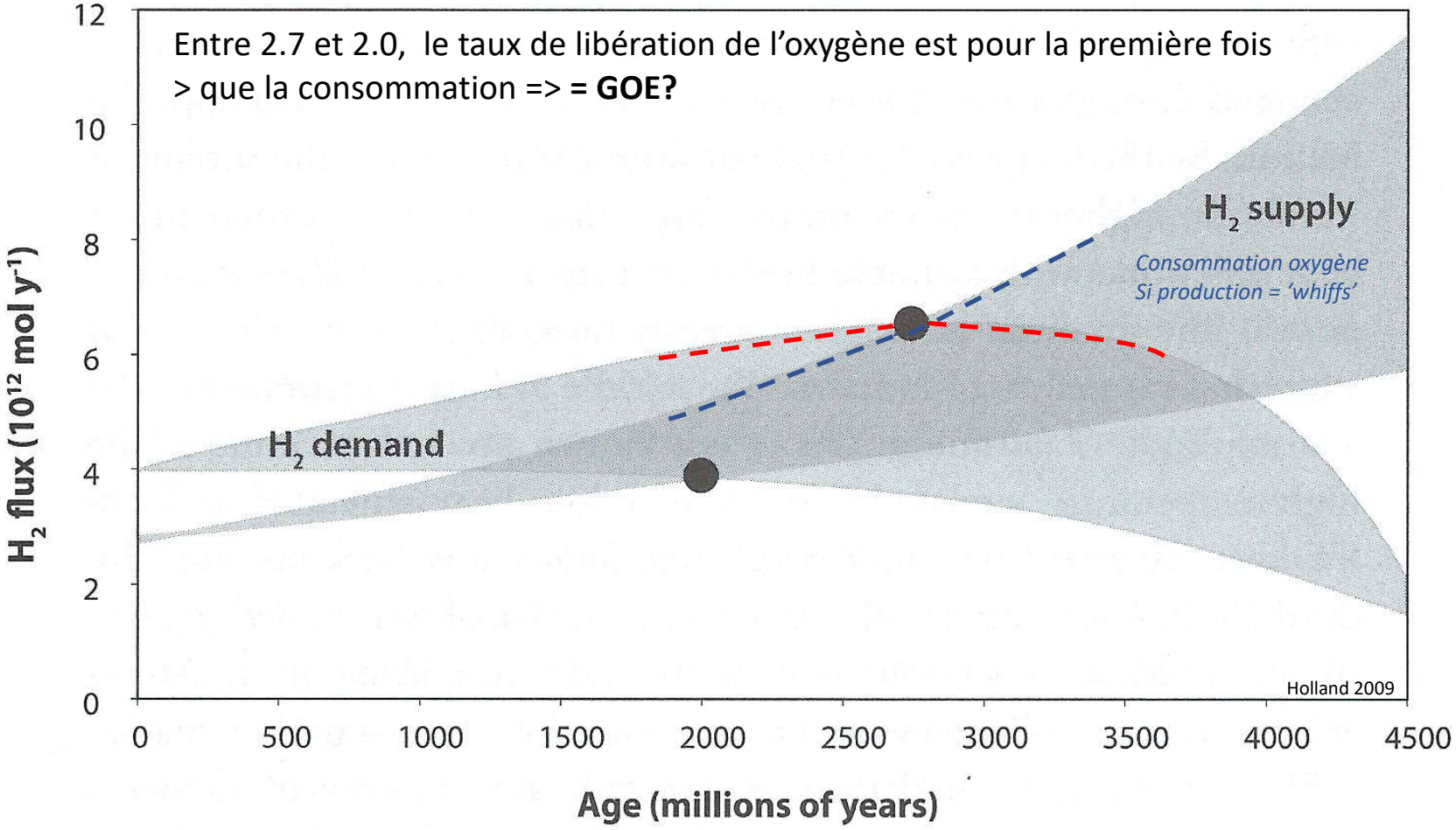
+ V/Cr vs Ni/Co
+U/Th vs Ni/Co
+V/(V+Ni)vsNi/Co
V/Al
Mo/Al
Cu/Al
Mo, V, U…(isotopes)
S, Fe, Mn…
CT %
etc

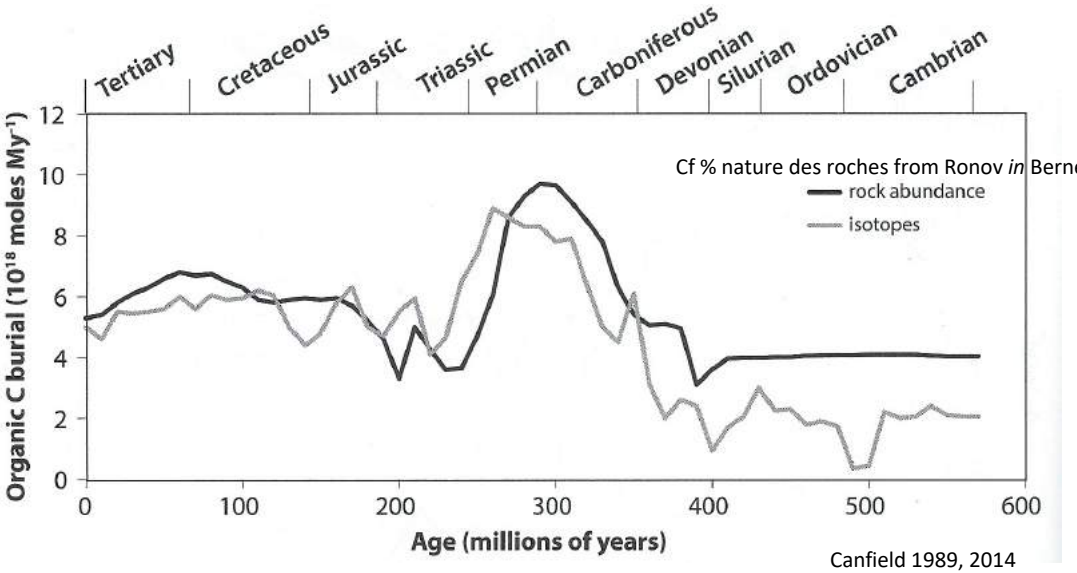


1 Diminution H_2 mantellique (H_2+1/2$O_{2[MO+Pyrite]}$=H_2O)
2 Altération MO + Pyrite (Black Shales)
3 Fin Sil/Dév :enfouissement premières forêts (Sil) = grands poissons (Dév)
4 C/P = 35% O_2 atm

FLUX D'HYDROGENE MANTELLIQUE vs TAUX DE LIBERATION DE L'OXYGENE

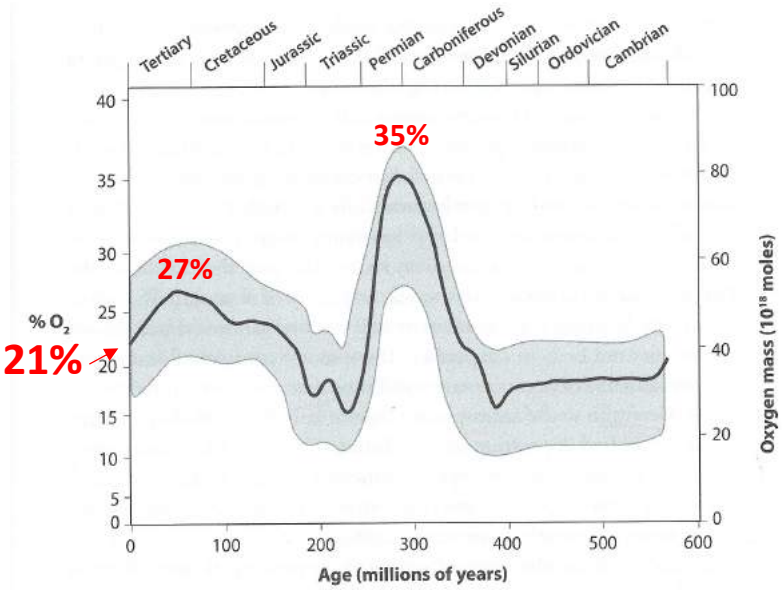
(Modélisation…)





Cf % nature des roches from Ronov *in* Berner and Canfield 1989

Canfield 1989, 2014

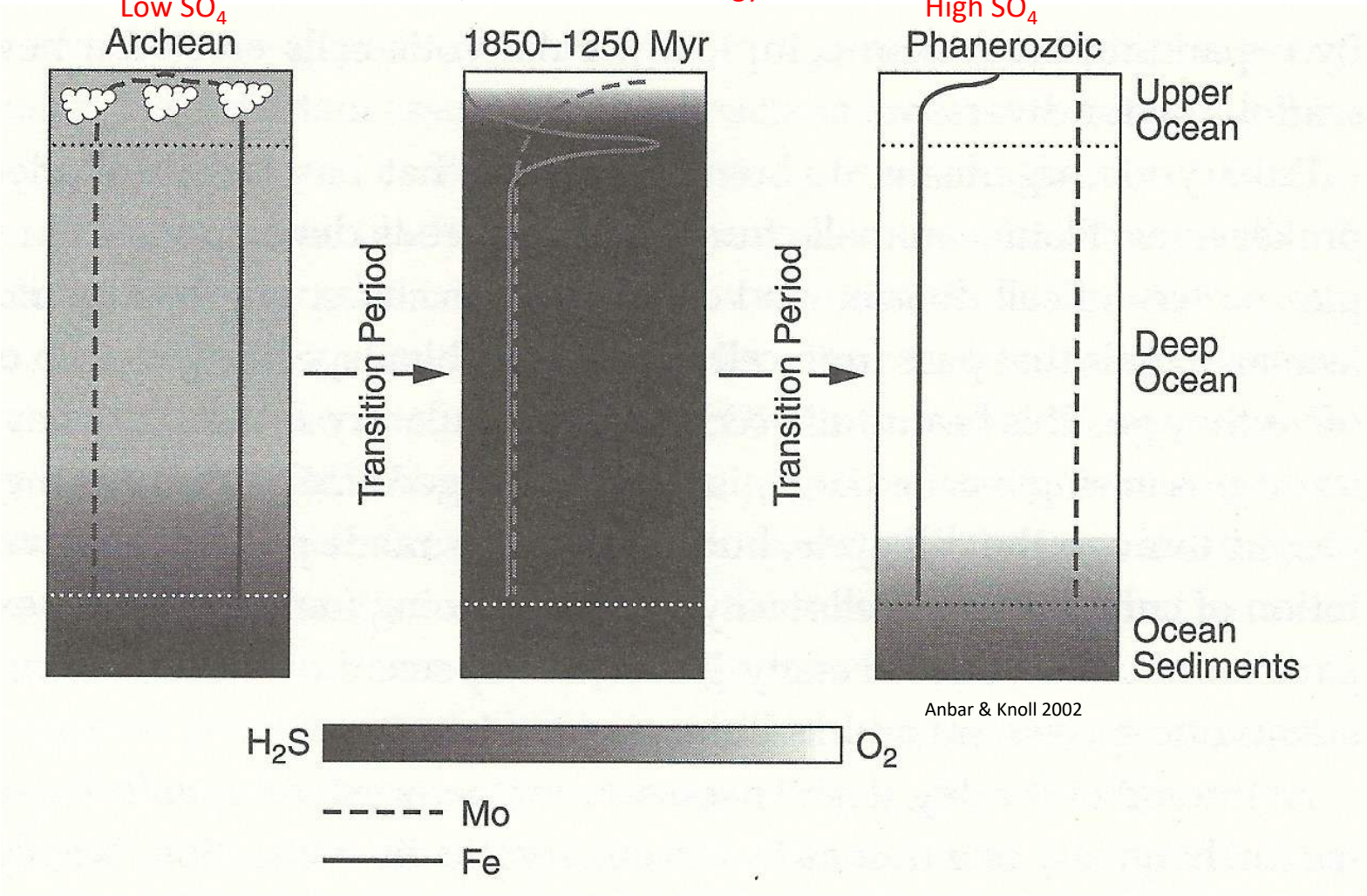


OCEAN EVOLUTION

Low O_2
High Fe
Low SO_4

Moderate O_2 (surface w)
High H_2S (deep w)
Fe, Mo limited ⇔ biology

High O_2
Low Fe
High SO_4



Anbar & Knoll 2002

BIF = BANDED IRON FORMATION

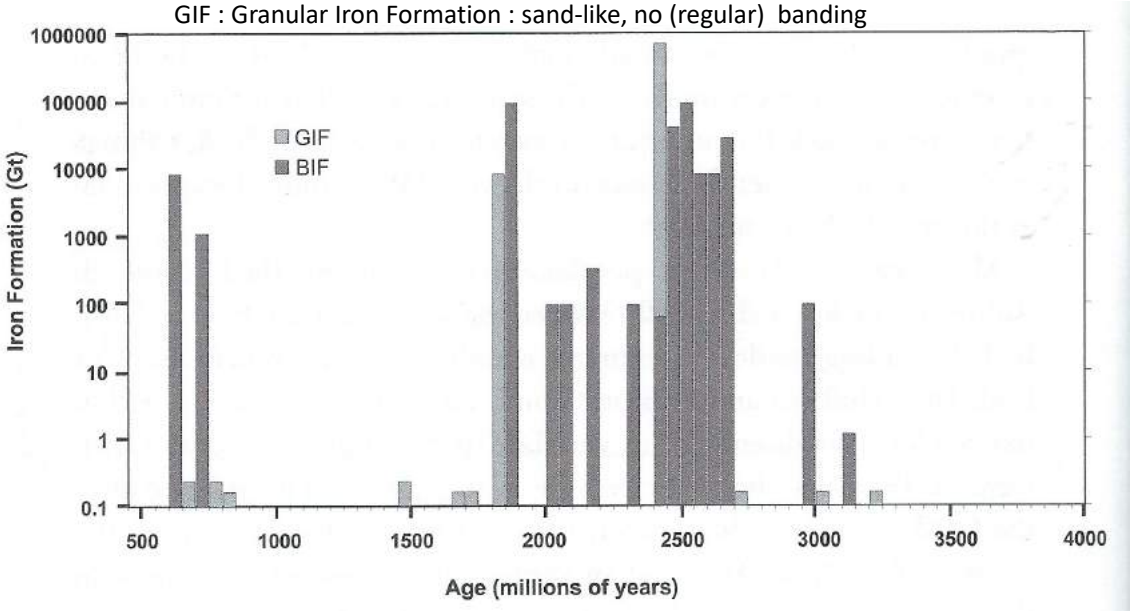
‘minerais de fer rubanés’, cf ArcelorMittal

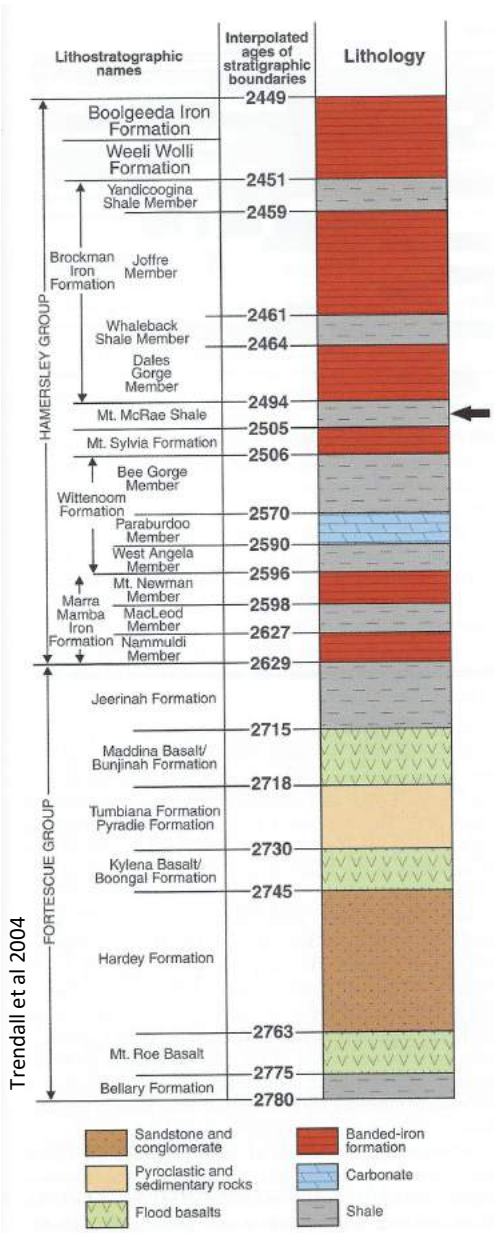
ARCHEEN-BASE PALEOPROTEROZOIQUE ET PONCTUELLEMENT NEOPROTEROZOIQUE

- Roches biochimiques, finement laminaires (silice/chert = 40 à 50%)), TRES RICHES en FER (15-35%- cf ArcelorMittal) = hématite/magnétite/(sidérite)((pyrite))+… => (jaspillites/itabirites au Brésil/taconites (bouclier canadien)
- Abondantes avant 1,8 Ga, surtout entre 2,7 et 2,3 Ga, souvent métamorphisées

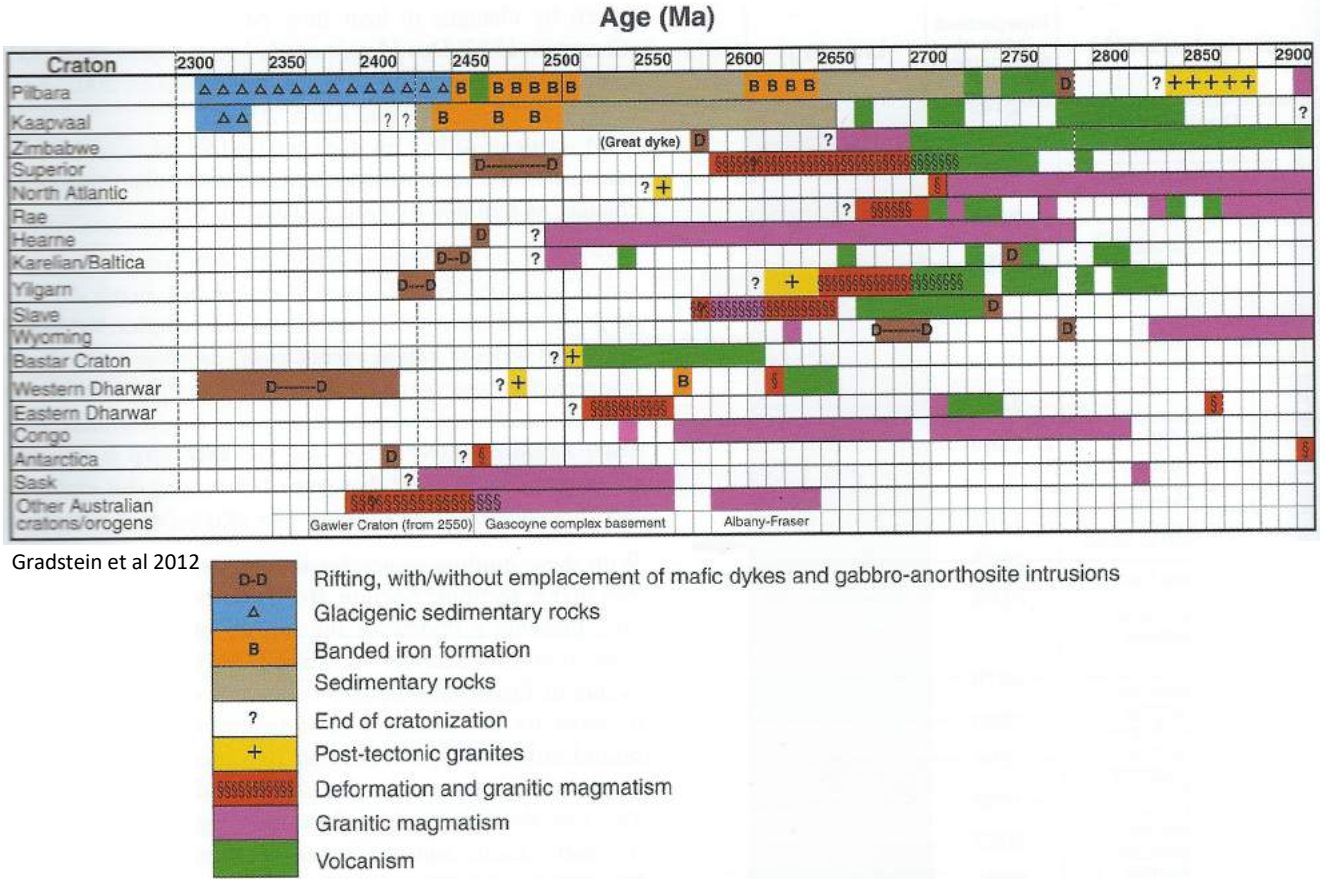
Témoignent d’une atmosphère dépourvue d’oxygène

GIF : Granular Iron Formation : sand-like, no (regular) banding





Trendall et al 2004



Gradstein et al 2012

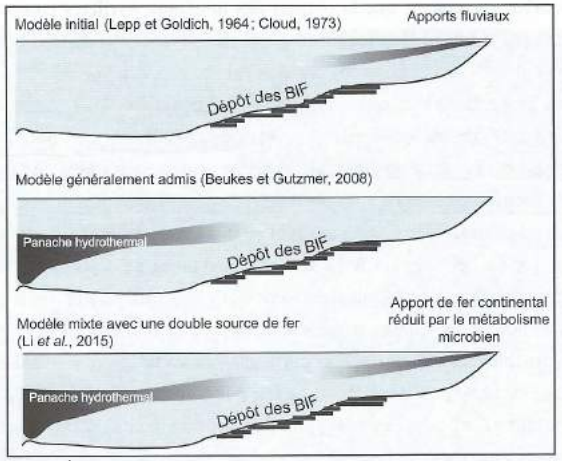
BIF = ORIGINE DU FER?

(**TRES) NOMBREUSES HYPOTHESES… depuis 1954**

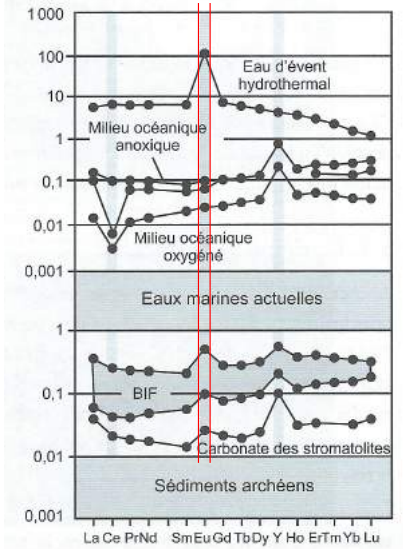
- Origine continentale (fleuves, rivières) => <u>pas</u> Al, <u>pas</u> terrigènes …
- Origine volcanique du Fe^{2+}
- Apports d'hématite détritique et dissolution dans sédiments riches en MO
- Précipitations
- …

- FINALEMENT (Li et al., 2015)
  processus/fuides hydrothermaux au voisinage des dorsales océaniques
  (car anomalie en Eu)
  et
  Fe continental réduit par organismes microbiens
  (rapports isotopiques du Nd et du Fe)
- En domaine marin, Fe^{2+} dissous réagit avec l'oxygène produit par les bactéries photosynthétiques (formant des stromatolithes) => hydro-oxydes de Fe^{3+}
  => la réaction $Fe/CO_2/HCO_3^-$ donne les carbonates, les sulfures de fer se forment à partir de la réaction Fe/H_2S

- RESTE LA SILICE? Cf. eaux continentales riches en silice dissoute car pas d'extraction par le phytoplankton (comme aujourd'hui => cycle biogéochimique très différent au Précambrien)

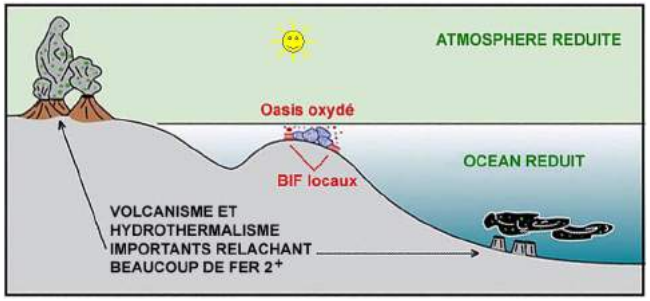


Li et al. 2015, 2007



Rollinson, 2007

BIF = MILIEUX DE FORMATION



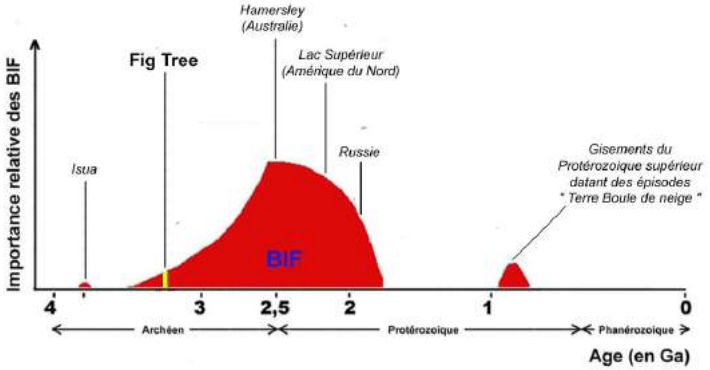
(TRES) NOMBREUSES HYPOTHESES… aussi

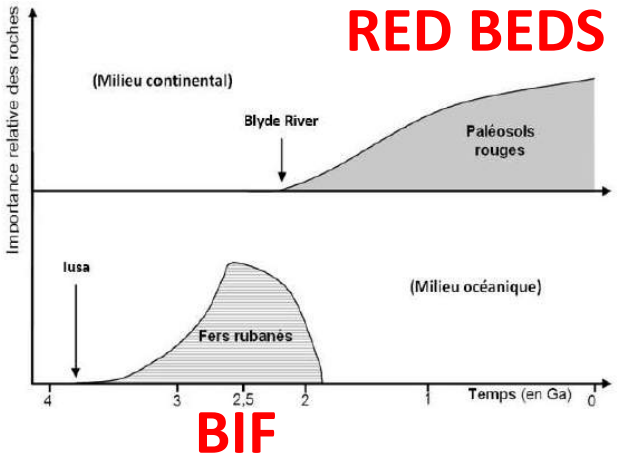
- car les BIF ne se forment plus aujourd'hui
- car les BIF ont subi (presque tous) un métamorphisme

- …

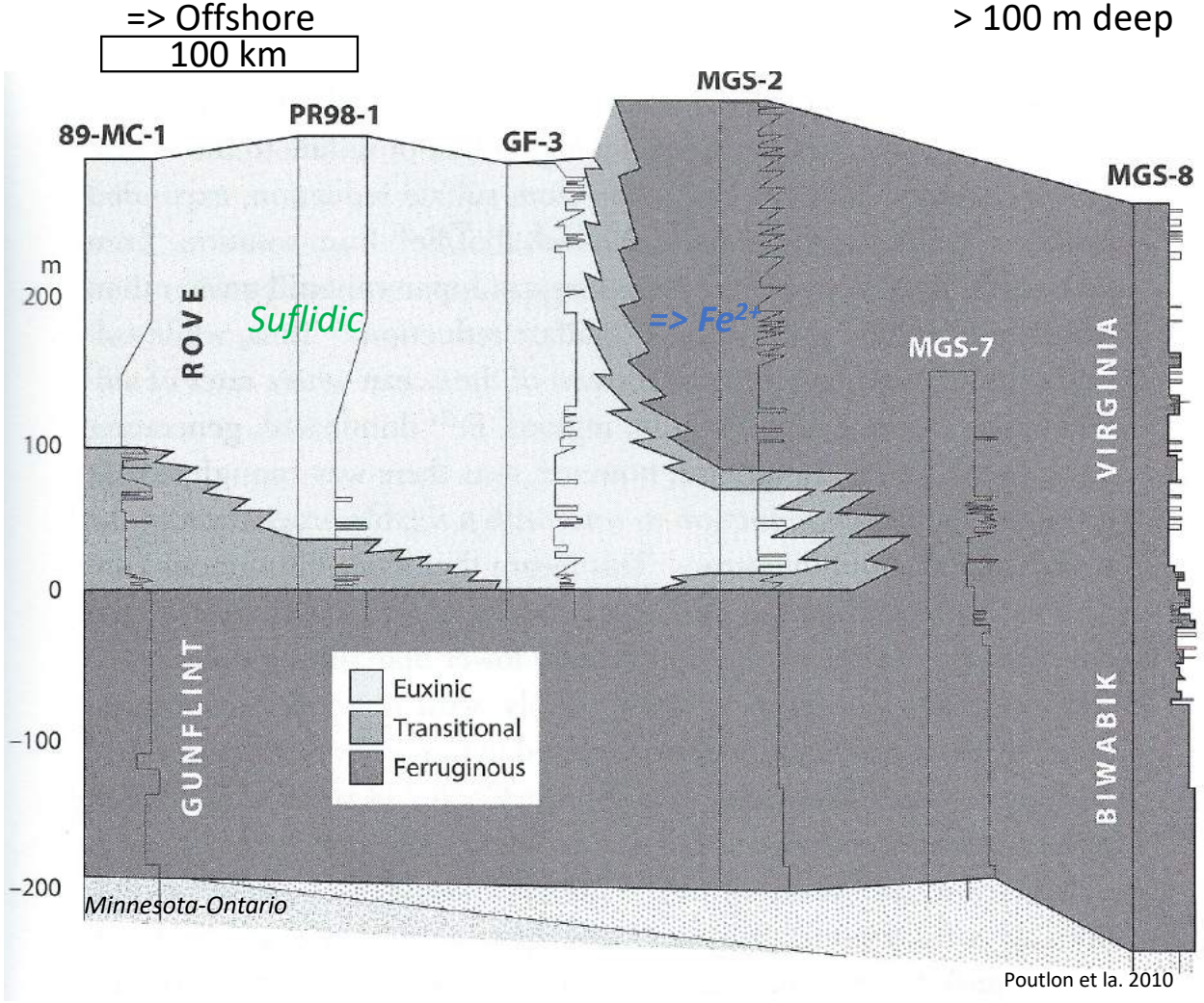
- FINALEMENT

- = milieu marin relativement peu oxygéné [p.ex. pas d'anomalie de Ce…]
- sous ZAT (préservation lamines) dans l'offshore supérieur => > ou env. 150 m?





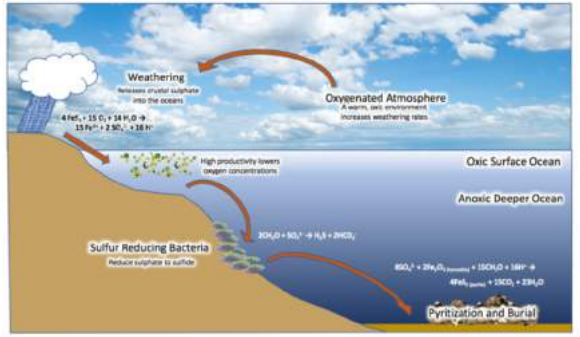
GUNFLINT IRON FORMATION/ROVE FORMATION c. 1.88 Ga



Poutlon et la. 2010

OTHER BIF GENESIS

Le Fe^{2+} dissous
est oxydé non
par l'oxygène
= 0,1% cf isotopes Cr
et altération MO du GOE…
mais par les sulfures



'CANFIELD OCEAN' deep anoxic sulfidic-rich ocean

'CANFIELD OCEAN' deep anoxic sulfidic-rich ocean

Les BIF 'disparaissent' à 1.8 Ga => ce n'est pas l'oxygène qui a empêché l'accumulation de Fe^{2+} dans les océans

=> Océans 'sulfidic' suite au réservoir sulfaté qui apparaît massivement à 1.8 Ga

$\Rightarrow$ Les atmosphères PPz-MPz contiennent assez d'oxygène pour oxyder les sulfures 'terrestres' mais pas assez pour maintenir un océan oxygéné => l'altération des sulfures = enrichissement en sulfates des océans via rivières

$\mathbf{FeS_2} + H_2O + O_2 = SO_4^{2-} + \mathbf{H_2S} + Fe^{2+}$

et les SO_4^{2-} deviennent l'oxydant le plus abondant dans l'océan (pfd) => <u>euxinique</u>

également suite à la réduction sulfatée bactérienne : $2CH_2O + SO_4^{2-} = 2HCO_3^- + \mathbf{H_2S}$

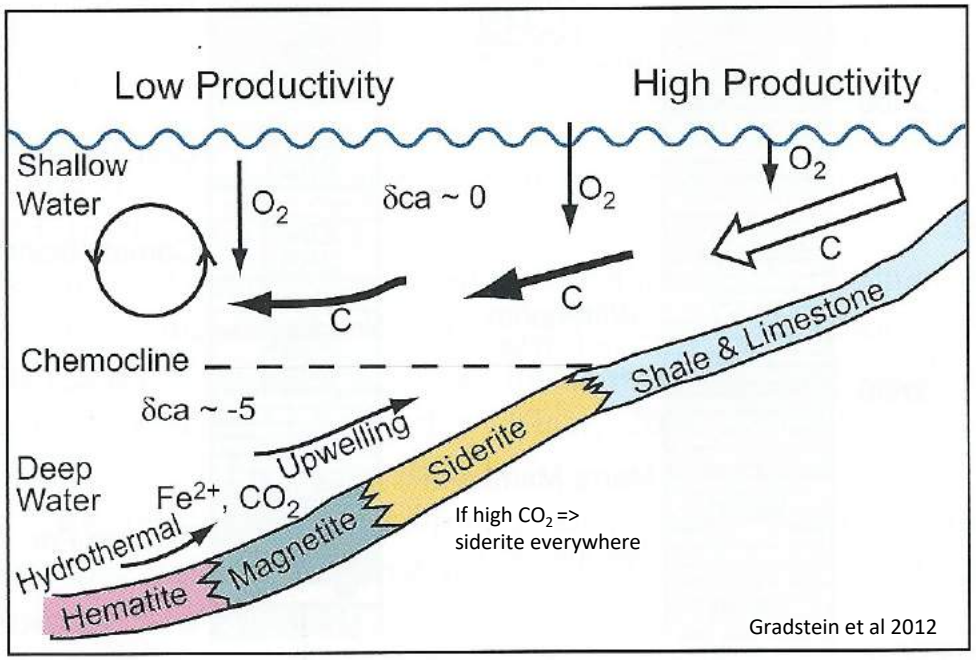
=> L'océan devient riche en Fe^{2+} et H_2S et vers 1.8 Ga Fe > H_2S (suite au dégazage de H_2S lié à une chémocline de faible profondeur ou à un enfouissement/piégeage de la pyrite).

Il n' a donc plus assez d'oxygène atm pour précipiter le Fe sous forme de BIF

BLACK SHALES
IN THE DEEP BASIN

Préat 2017

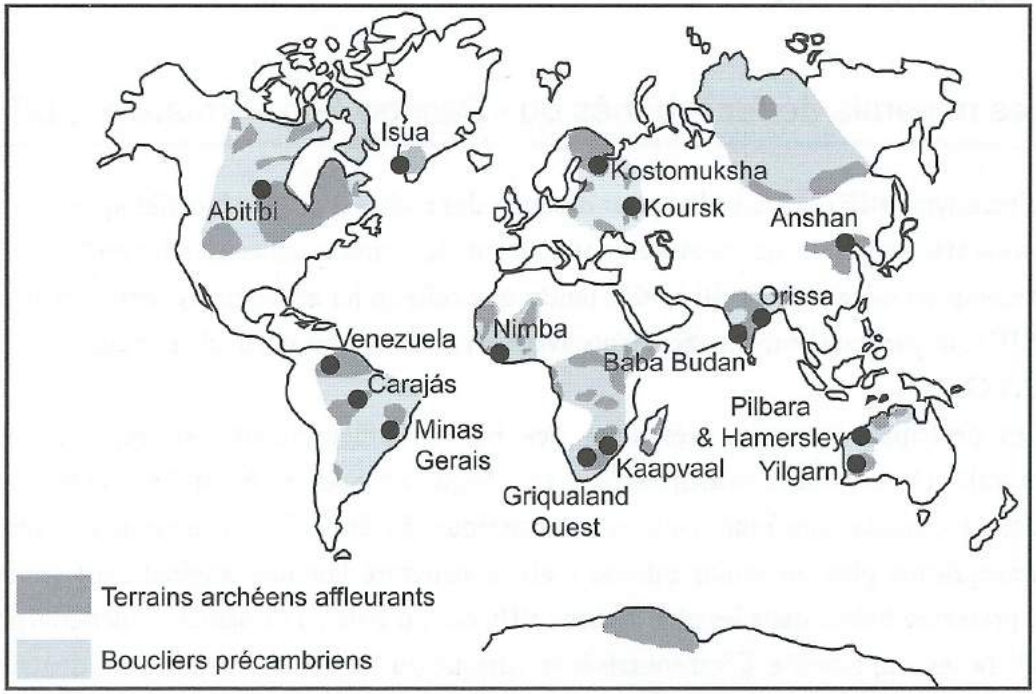
BIF IN THE BASIN
Max. 2.6-2.5 Ga,up to 900m-thick (Australia)



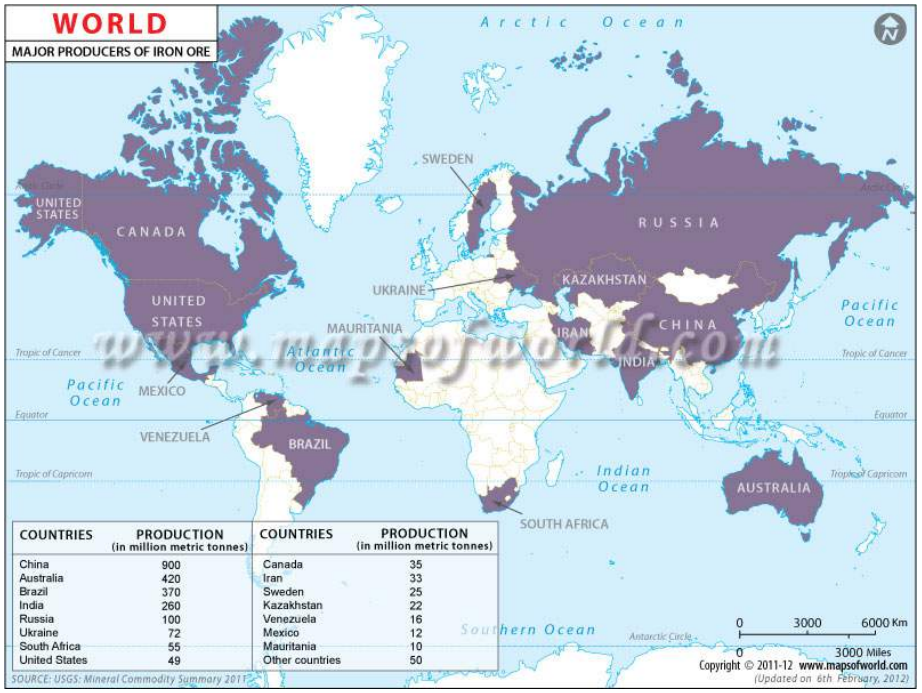
HAMERSLEY BASIN (AUSTRALIA:
Continental platform, below SWB
Upwelling of deep ocean Fe (?mid-ocean)
Hydrothermal systems mixing O2 in the stratified ocean
(BIF interbedded with black shales)

STROMATOLITHES + EVAPORITES
SHALLOW WATER, CARBONATE PLATFORM

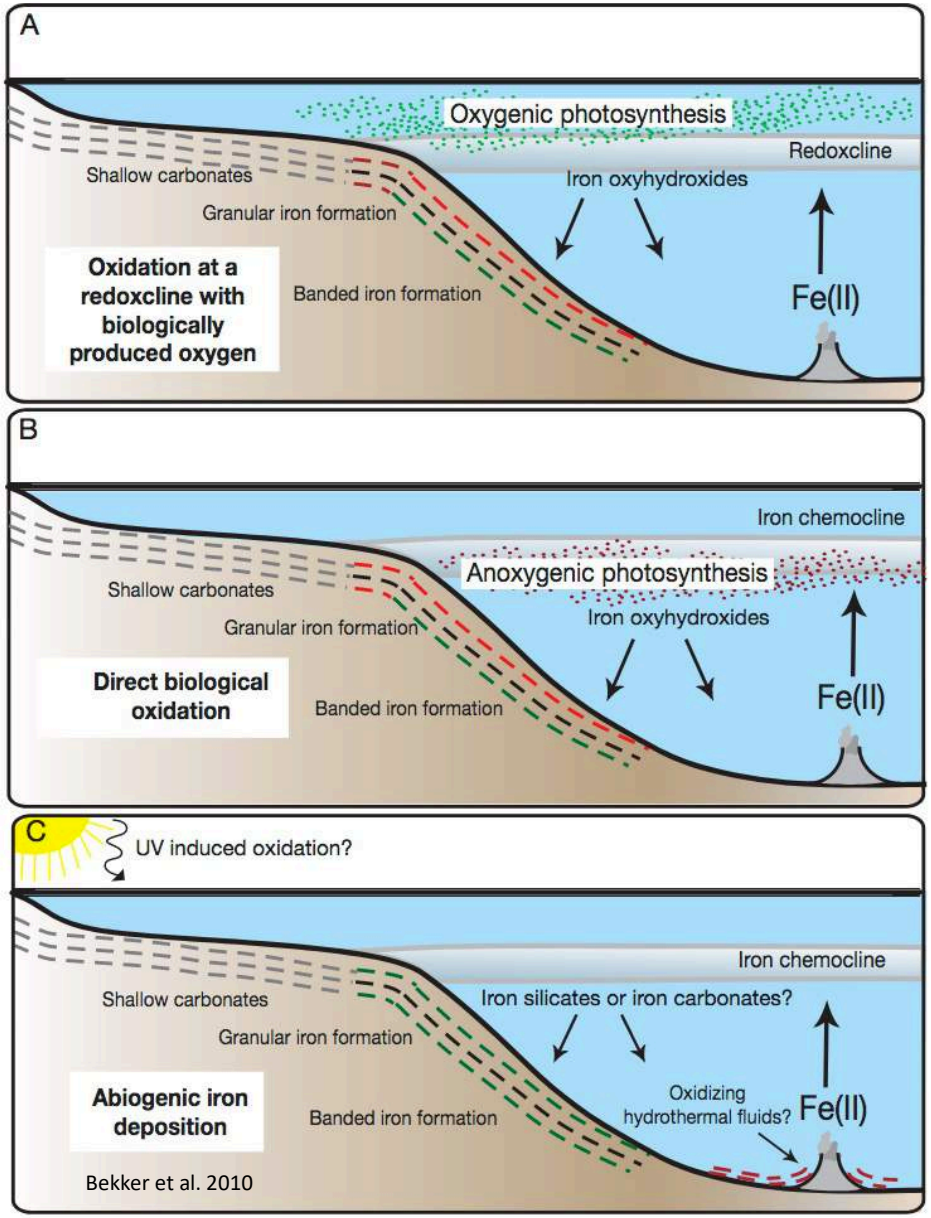
Préat 2017



Deconinck 2017



COUNTRIES	PRODUCTION (in million metric tonnes)	COUNTRIES	PRODUCTION (in million metric tonnes)
China	900	Canada	35
Australia	420	Iran	33
Brazil	370	Sweden	25
India	260	Kazakhstan	22
Russia	100	Venezuela	16
Ukraine	72	Mexico	12
South Africa	55	Mauritania	10
United States	49	Other countries	50



Mainly Proterozoic
in shallow environments

Mainly Archean
in shallow environments

Photochemical oxidation
=
insignifiant

LE PRECAMBRIEN : QUE D'EVENEMENTS…

MERCI …