

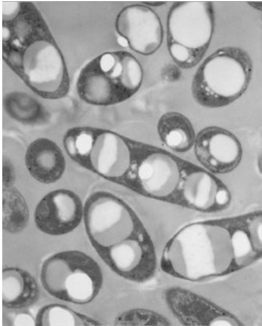
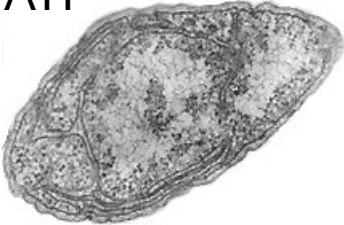


Leçon 2 : L'oxygénation de la Terre

Le métabolisme cellulaire

Besoin	Métaphore	Forme typique
Carbone	 Les « briques »	Glucides, lipides, protéines
Énergie	 La « monnaie d'échange »	ATP

La diversité des métabolismes

	Autotrophie	Hétérotrophie
Phototrophie	Lumière → ATP CO₂ → Biomasse  <i>Anabaena sphaerica</i>	Lumière → ATP Acétate → Biomasse  <i>Rhodobacter capsulatus</i>
Chimiotrophie	Oxydation NH₄⁺ → ATP CO₂ → Biomasse  <i>Nitrosomonas europaea</i>	Oxydation H₂S → ATP Acétate → Biomasse  <i>Arcobacter peruensis</i>

La diversité des photosynthèses

- Photosynthèse oxygénique

Donneur
d'électrons

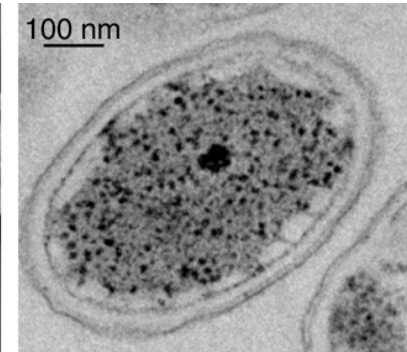
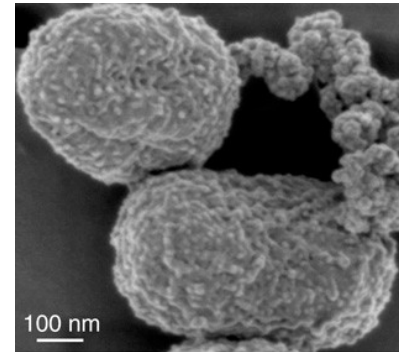
Chez les procaryotes,
seules les **cyanobactéries**
en sont capables



- Photosynthèses anoxygéniques (très variées)



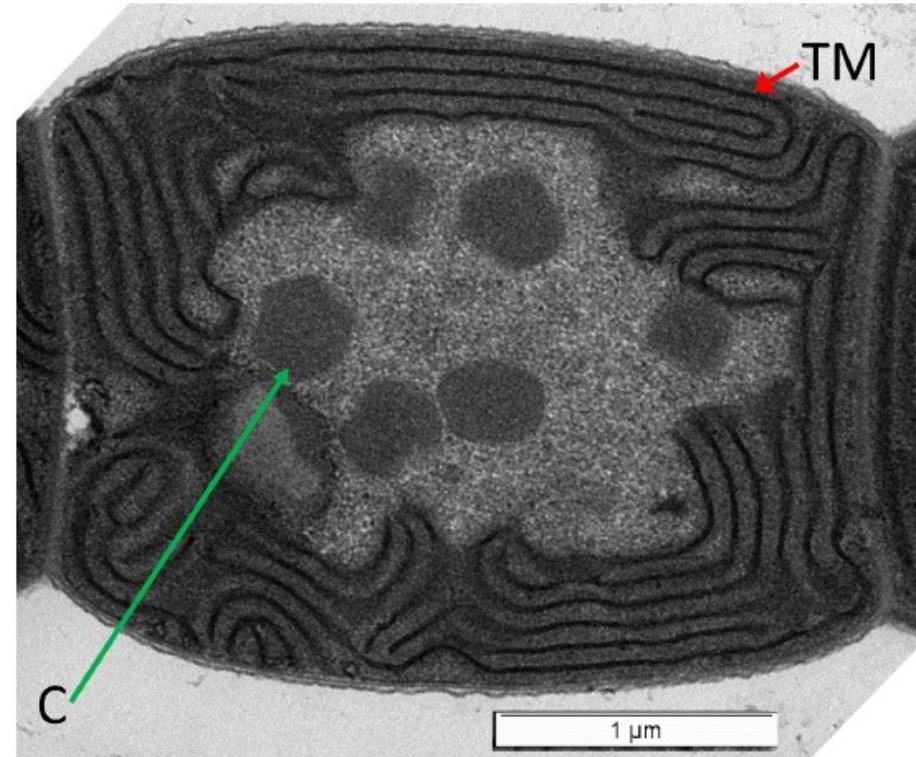
Donneur
d'électrons



Chlorobium phaeoferrooxidans,
Photoferrotrophe actuel. Barres : 100 nm
(Thompson et al. 2019)

Les cyanobactéries

- Procaryotes : pas de noyau, pas de mitochondrie, pas de chloroplaste.
- Photosynthèse oxygénique : productrices d'O₂
- Photosystèmes dans la membrane plasmique (condition primitive) ou plus souvent dans des membres internes appelées thylakoïdes (condition dérivée)
- À l'origine des chloroplastes des plantes (eucaryotes)



Fremyella diplosiphon (MET).

TM : thylakoïdes, C : carboxysomes.

Barre : 1 μm (Montgomery 2015)

Expérience

D'où viennent les atomes d'oxygène du O₂ ?

- Ruben et al. (1941) : Une expérience historique
<https://pubs.acs.org/jacsat/article-abstract/63/3/877/433354/Heavy-Oxygen-O18-as-a-Tracer-in-the-Study-of>
- ¹⁸O isotope stable lourd, sert de marqueur

Eau fournie	CO ₂ fourni	Dioxygène produit
Composition isotopique ordinaire	Composition isotopique ordinaire	Composition isotopique ordinaire
Composition isotopique ordinaire	Enrichie en ¹⁸ O	Composition isotopique ordinaire
Enrichie en ¹⁸ O	Composition isotopique ordinaire	Enrichie en ¹⁸ O

- Les atomes du O₂ photosynthétique viennent de l'eau, pas du CO₂ !

Bien interpréter les stromatolites

- Une structure sédimentaire laminée
- Des indices d'activité microbienne
- La forme seule ne révèle pas le métabolisme



Stromatolite $\neq$ Cyanobactéries
Stromatolite $\neq$ Dioxygène
Stromatolite $\neq$ Photosynthèse

Interprétation

Djokic et al. (2017)

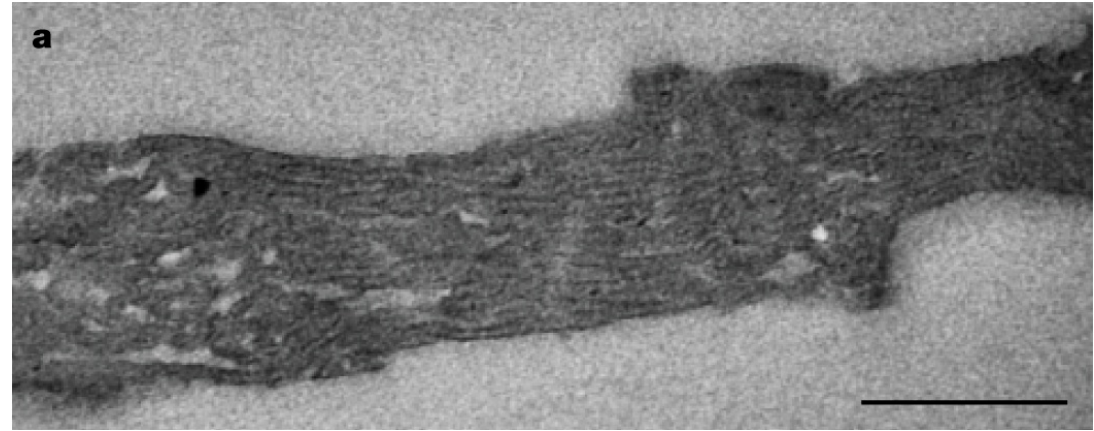
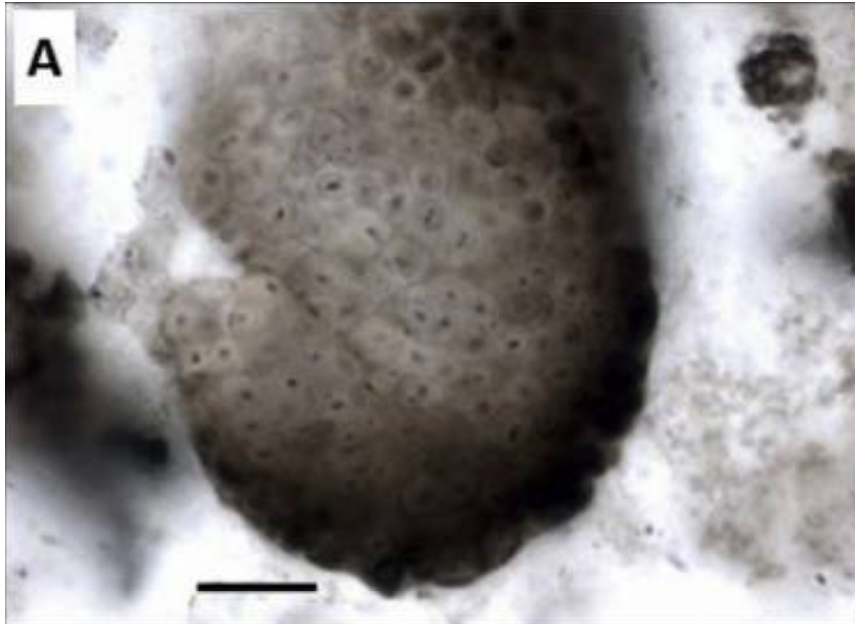
<https://www.nature.com/articles/ncomms15263>



Stromatolites coniques,
Dresser Formation (3,48 Ga)

Les plus vieux fossiles de cyanobactéries

- Les fossiles fournissent un **âge minimal**



Navifusa majensis, McDermott (Australie). Membranes interprétées comme des thylakoïdes.

1,73-1,78 Ga ; barre : 200 nm. Demoulin et al. (2024).

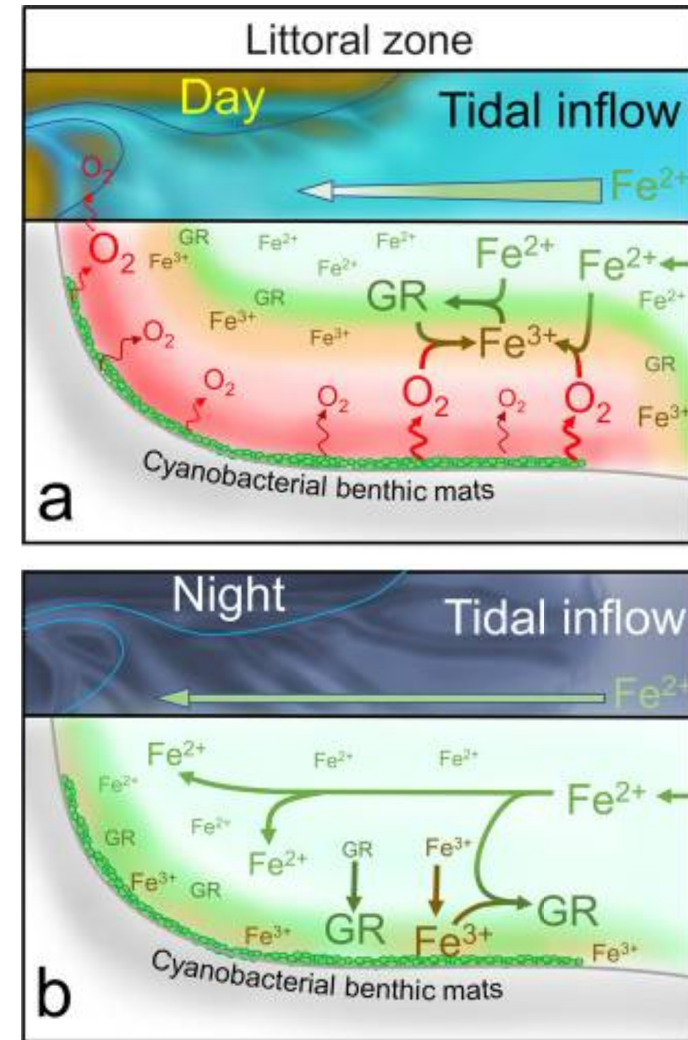
<https://www.nature.com/articles/s41586-023-06896-7>

Eoentophysalis belcherensis, Kasegalik Formation (Canada).
1,84-1,89 Ga ; barre : 20 μ m. Demoulin et al. (2019)

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6880289/>

Début de la production de O₂

- « **Oasis d'oxygène** » = Milieux localement oxygénés dans un monde anoxique (Cañadas et al. 2025)
<https://www.nature.com/articles/s41561-025-01678-4>
- Les + vieilles = **2,95 Ga** indices indirects d'oxydes de Mn (Formation de Sinqeni, ZA) (Planavsky et al. 2014)
<https://www.nature.com/articles/ngeo2122>
- Des indices possibles avant 3 Ga, rien de certain (Westall, 2025)
<https://royalsocietypublishing.org/rstb/article/380/1931/20240106/235013/What-the-earliest-evidence-for-life-tells-us-about>
- MAIS l'atmosphère ne s'oxygène pas tout de suite



(Herrmann et al. 2021)

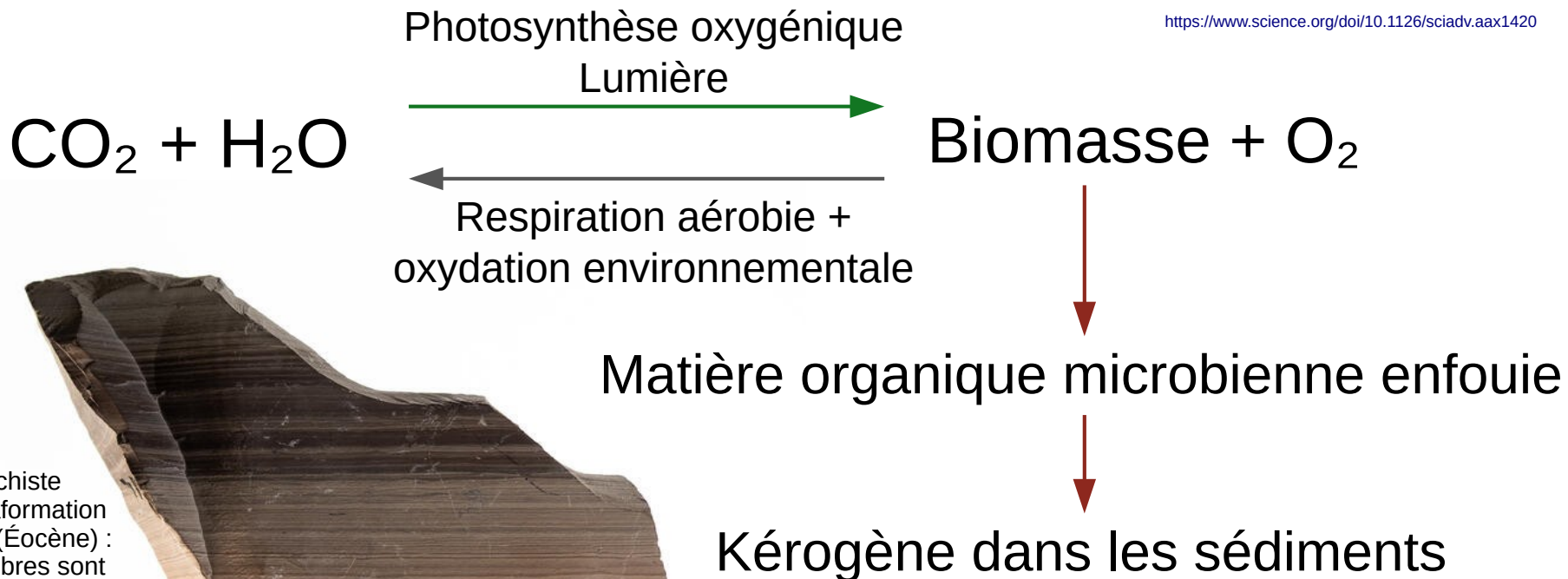
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8024245/>

Produire $\neq$ Accumuler du O_2

- L'enfouissement sédimentaire favorise l'accumulation de O_2

Catling et Zahnle (2020)

<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax1420>



Échantillon de schiste bitumineux de la formation de Green River (Éocène) : les bandes sombres sont riches en kérogène (USGS)



Cai et al. (2023) <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009254123004370>

Les formations de fer rubané (BIF)

- Dépôts d'hématite, magnétite, sidérite (BIF ou *banded iron formations*)

Hydroxyde de fer(III) : $O_2 + 4 Fe^{2+} + 10 H_2O \rightarrow 4 Fe(OH)_3 + 8 H^+$

Hématite : $2 Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 + 3 H_2O$

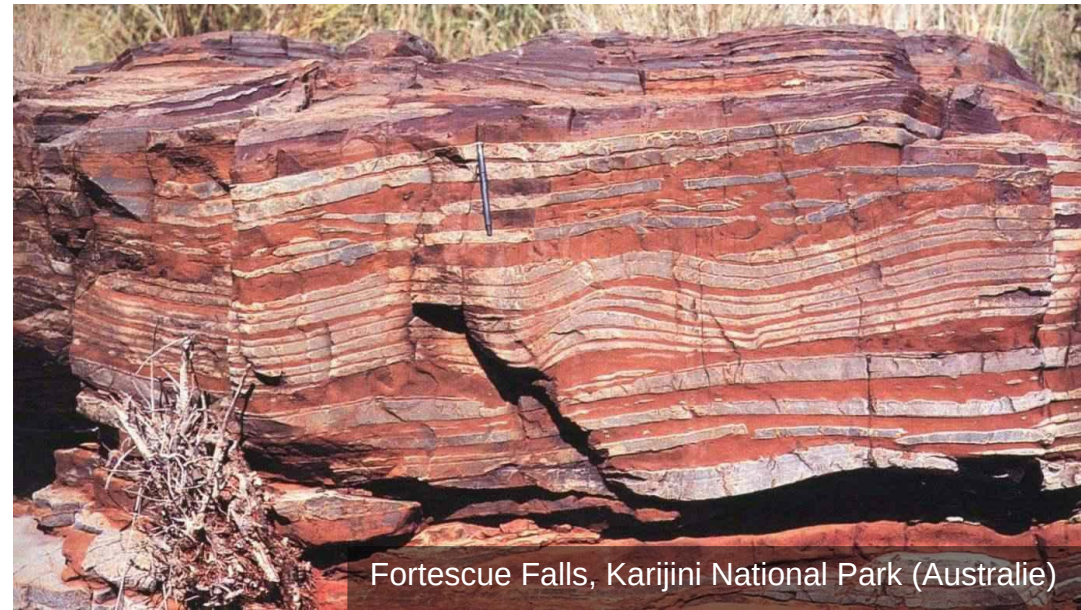
Exemples

- Mécanisme abiotique possible : les BIF n'indiquent pas forcément la présence d' O_2 (François 1986)

<https://www.nature.com/articles/320352a0>

- Dépôts principaux entre 2,7 Ga et 1,8 Ga, maximum de dépôt entre 2,6 Ga et 2,4 Ga (Song et al. 2017)

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5577183/>



Fortescue Falls, Karijini National Park (Australie)

La Grande Oxygénation (GOE)

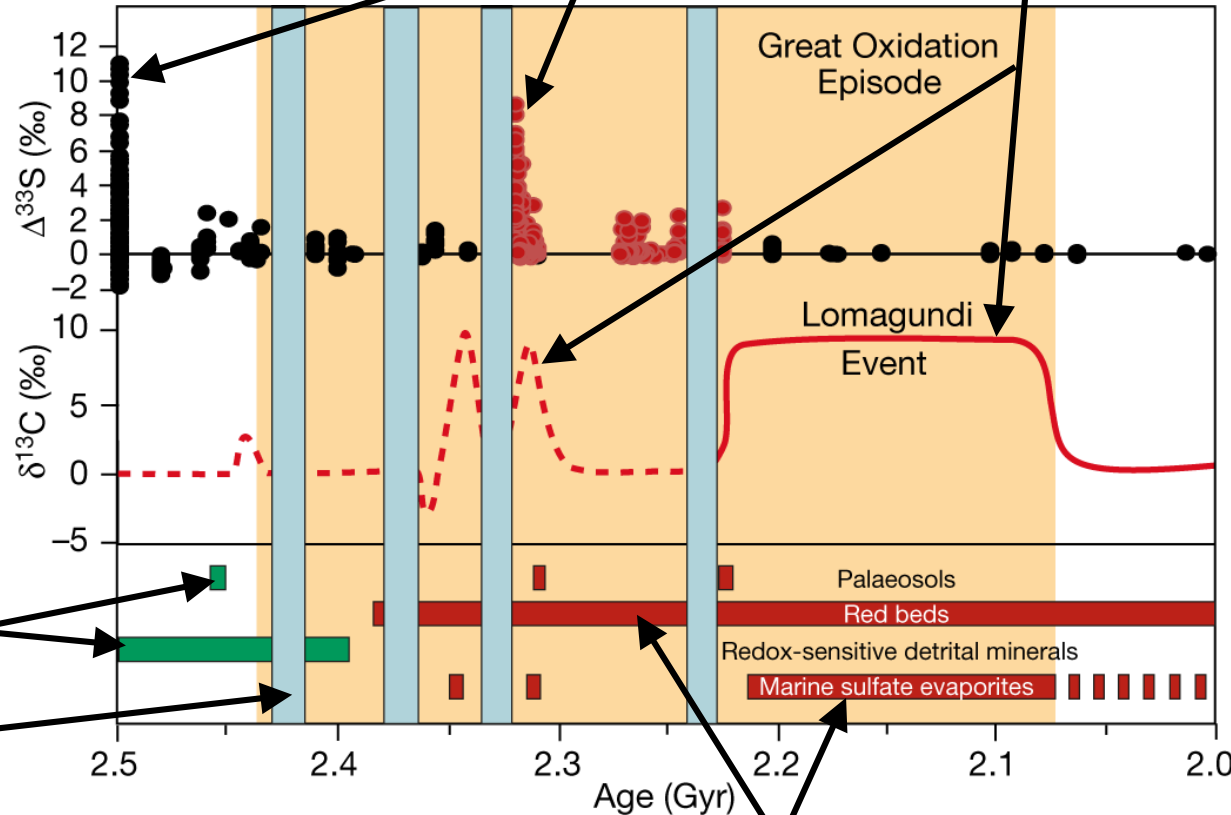
- *Great Oxidation Event* = Période de transition
→ Accumulation de O₂ atmosphérique durable
- Début vers 2,5-2,4 Ga, selon les critères retenus
- Des fluctuations ont pu se prolonger jusque vers 2,2-2,1 Ga

conditions anoxiques

4 épisodes glaciaires :
les glaciations huroniennes

S-MIF : atmosphère
très pauvre en O₂

Beaucoup de ¹³C dans
les carbonates = fort
enfouissement de
matière organique ?



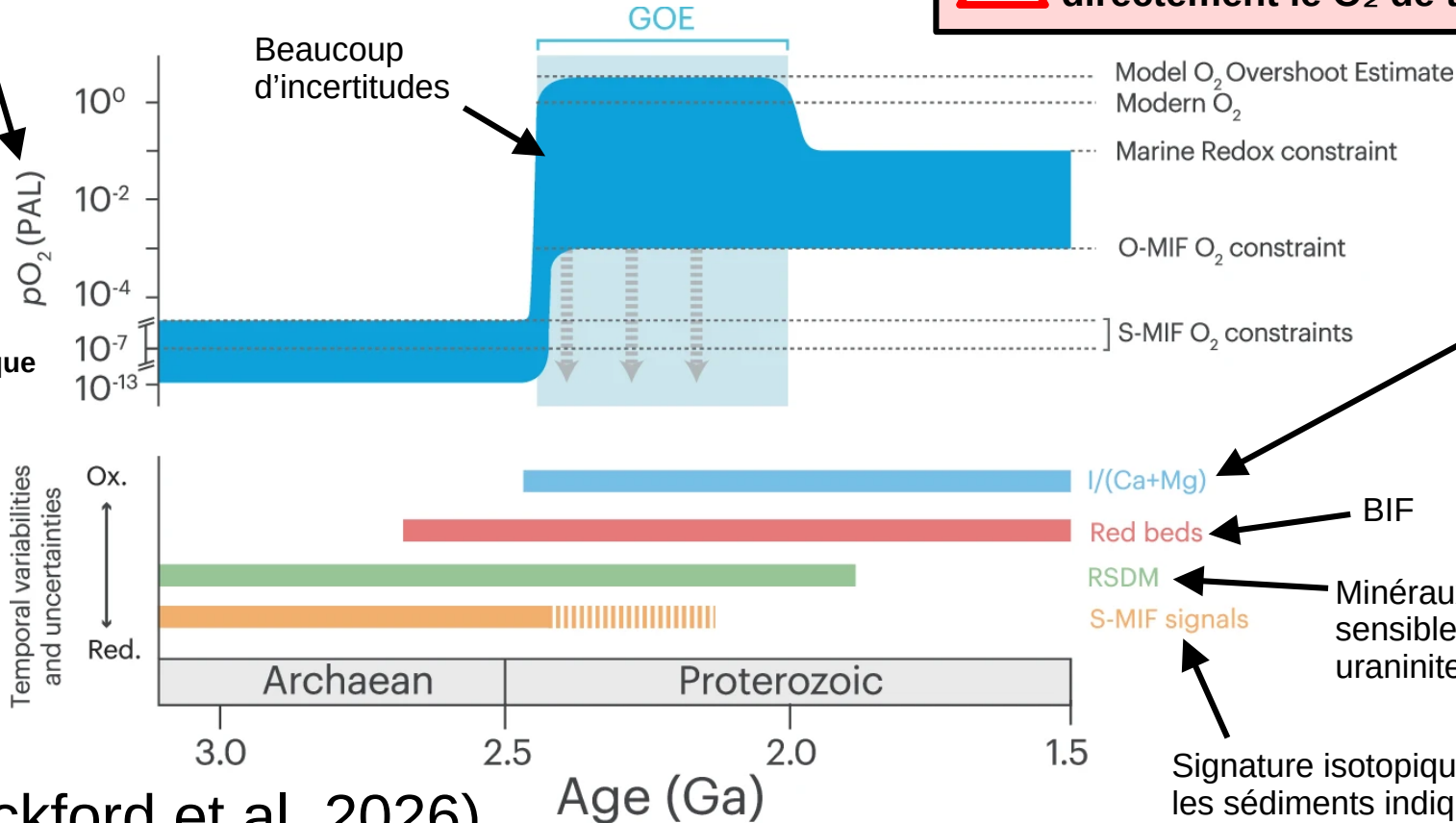
(Poulton et al. 2021)

conditions oxygénées

Des niveaux de O₂ encore très discutés

PAL = *present atmospheric level*

Échelle logarithmique



Une mesure locale ne donne pas directement le O₂ de toute l'atmosphère

Des indices indirects

L'iodate IO³⁻ (oxydé) s'incorpore plus facilement aux carbonates que l'iodure I⁻ (réduit)

BIF

Minéraux détritiques (érosion) sensibles à l'oxydation : pyrite, uraninite, sidérite

Signature isotopique du soufre ($\Delta^{33}\text{S}$) dans les sédiments indiquant une exposition aux UV du soufre atmosphérique

(Crockford et al. 2026)