

VOYAGE AU DÉBUT DE L'HISTOIRE DE LA TERRE

Starting grant
GO for ISOBIF



European Research Council
Established by the European Commission

Marion Garçon

Chargée de recherche au CNRS

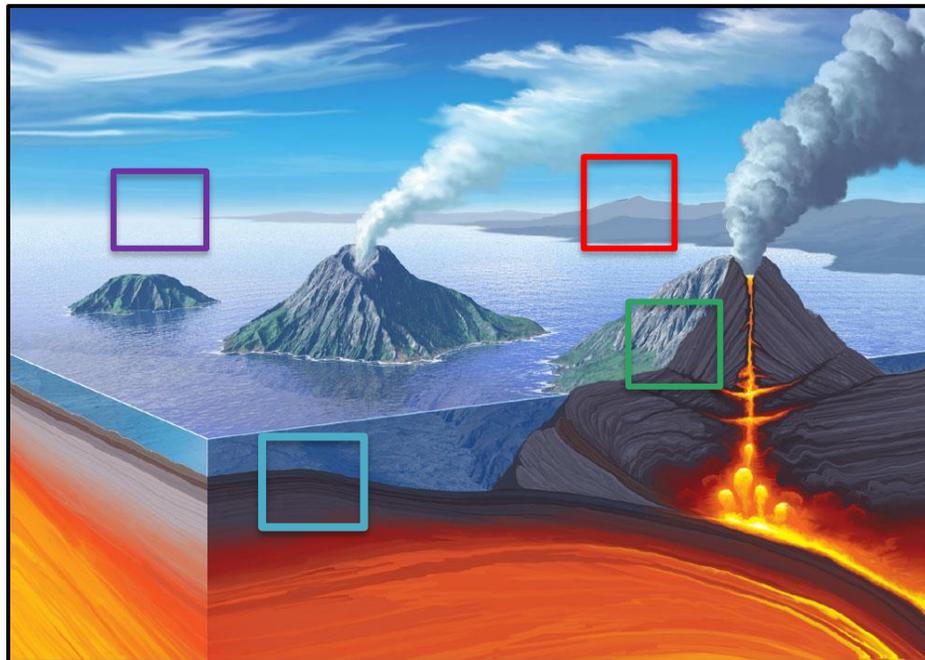
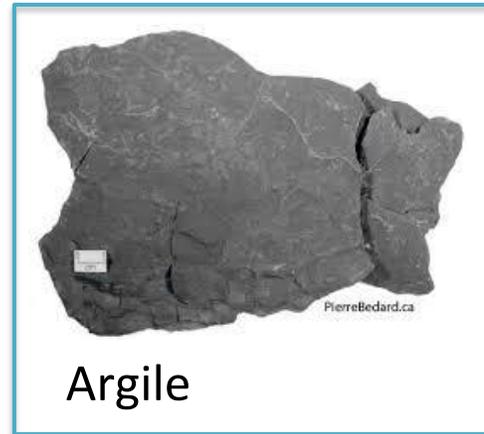
Géochimiste au Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont-Ferrand



Que nous apporte la géochimie pour
étudier les processus géologiques ?

QU'EST CE QUE LA GÉOCHIMIE ?

Etude de la composition chimique des roches, des minéraux, de l'eau



PROCESSUS GÉOLOGIQUES

- Étude des édifices volcaniques
- Origine profonde des magmas
- Composition, formation, évolution des enveloppes terrestres
- Évènements géologiques majeurs au cours de l'histoire de la Terre

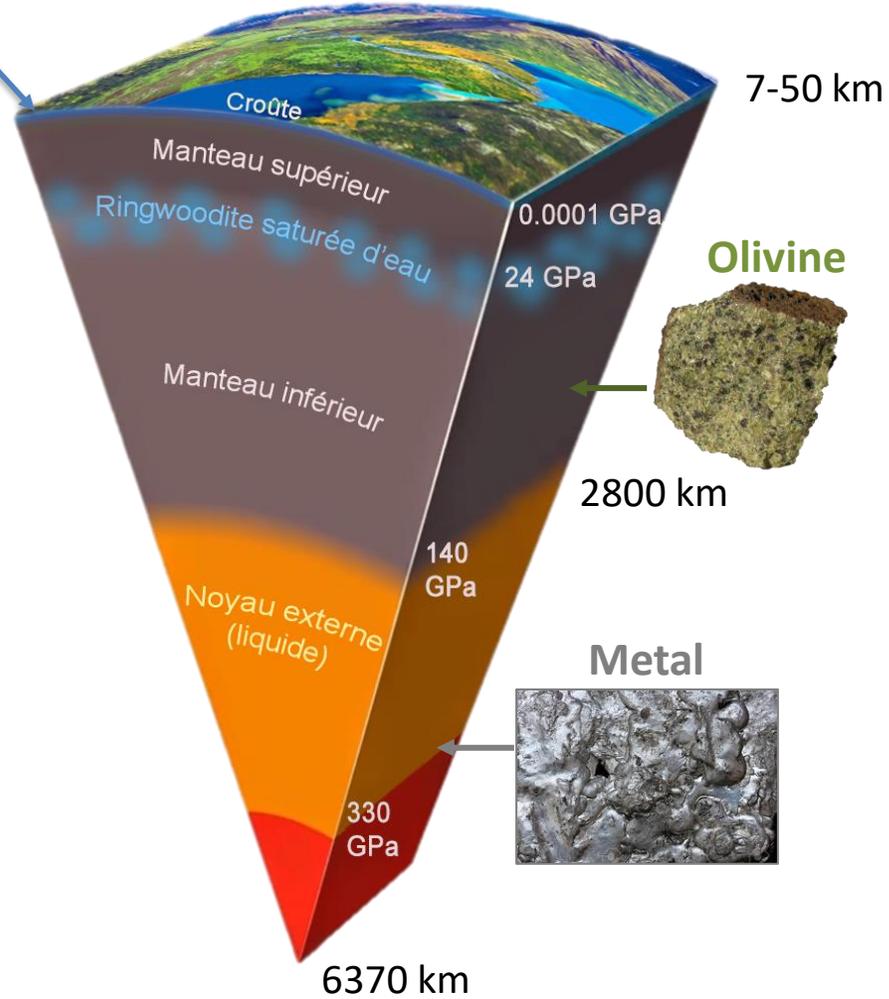
Granite

Basalte



Argile

COMPOSITION CHIMIQUE DE LA TERRE



Granite Basalte



Argile

COMPOSITION CHIMIQUE DE LA TERRE

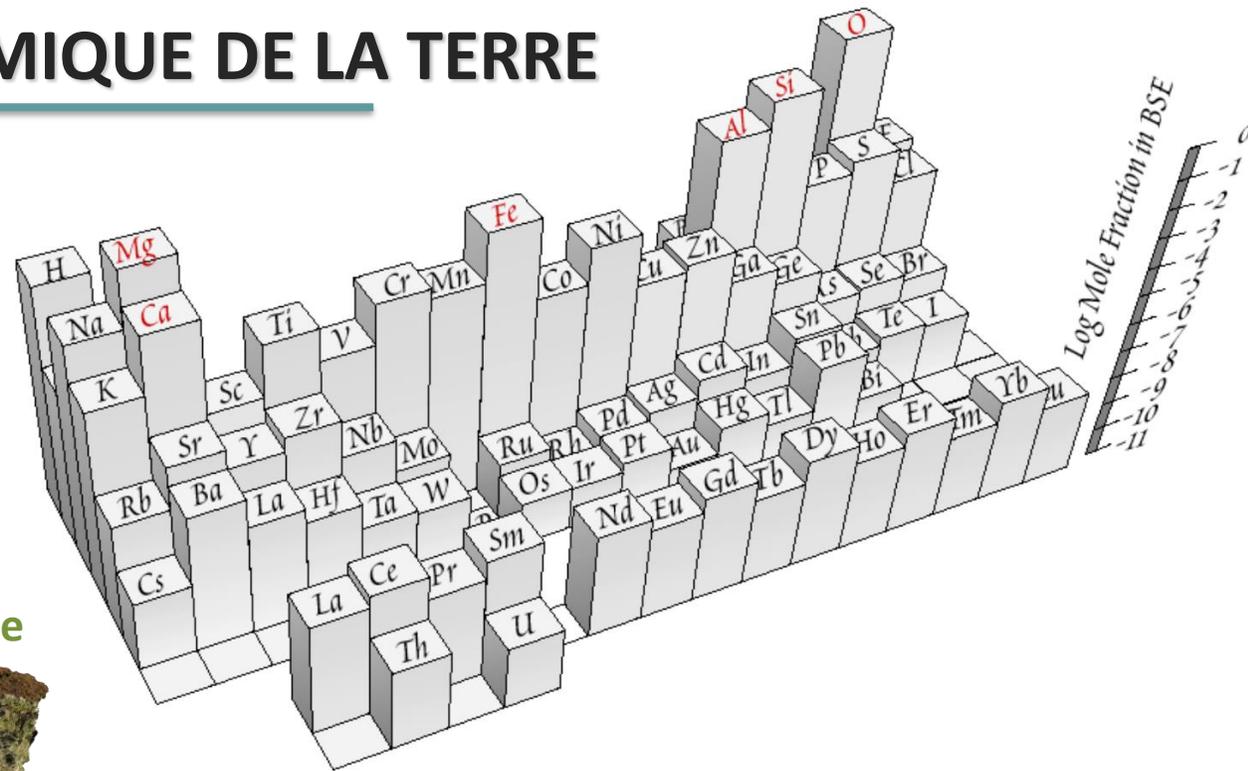
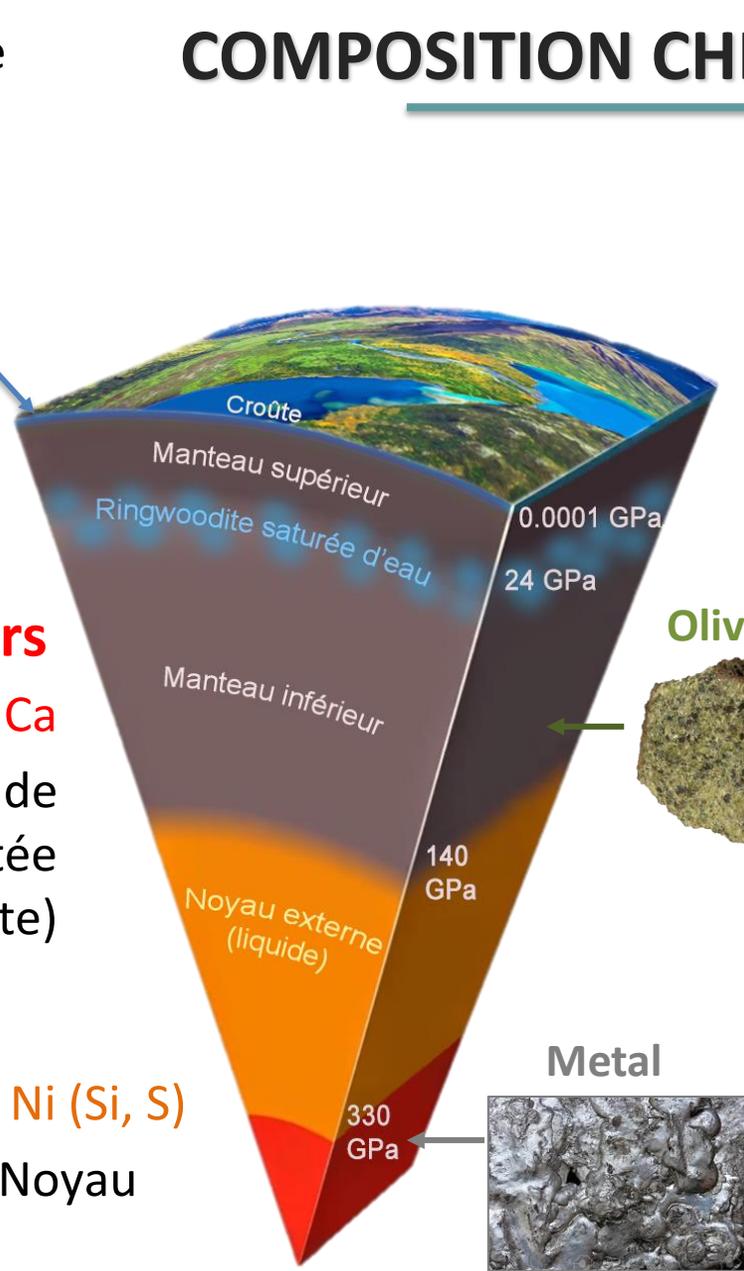
Éléments majeurs

O, Si, Al, Fe, Mg, Ca

→ 99% de la masse de la Terre silicatée (manteau + croûte)

Fe, Ni (Si, S)

→ Noyau



Olivine



Metal



Éléments "traces"

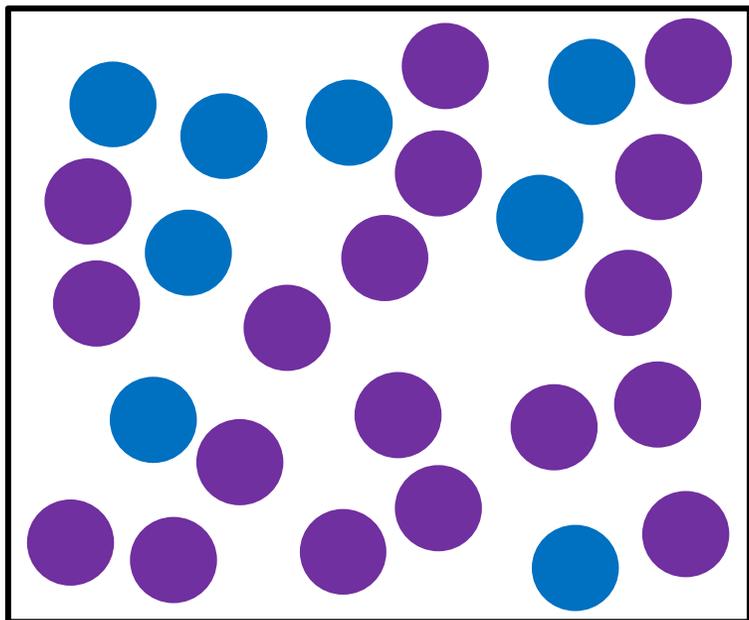
En substitution ou impureté dans les minéraux

(ppm = 10^{-6} g d'élément / g de roche)

Variabilité importante

CONCENTRATIONS ET COMPOSITIONS ISOTOPIQUES

Concentrations

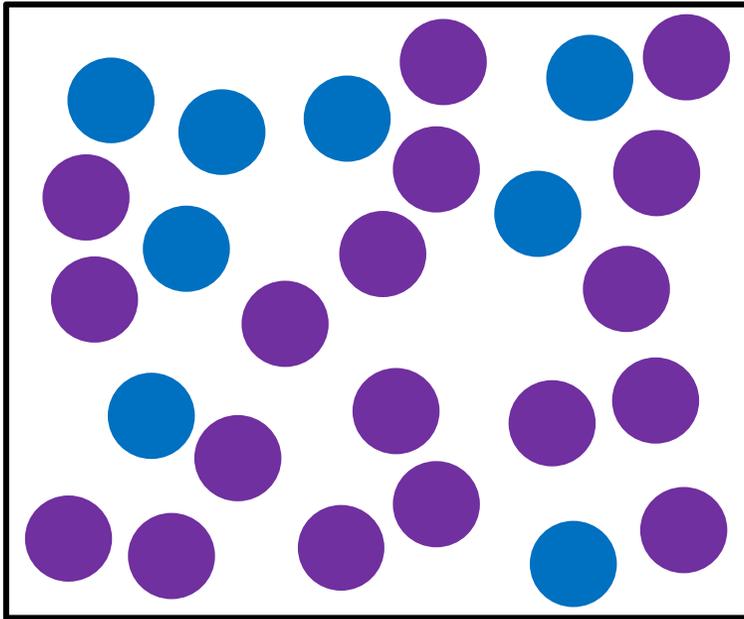


Quantité d'élément chimique (μg)
par gramme de roche (ppm)



CONCENTRATIONS ET COMPOSITIONS ISOTOPIQUES

Concentrations

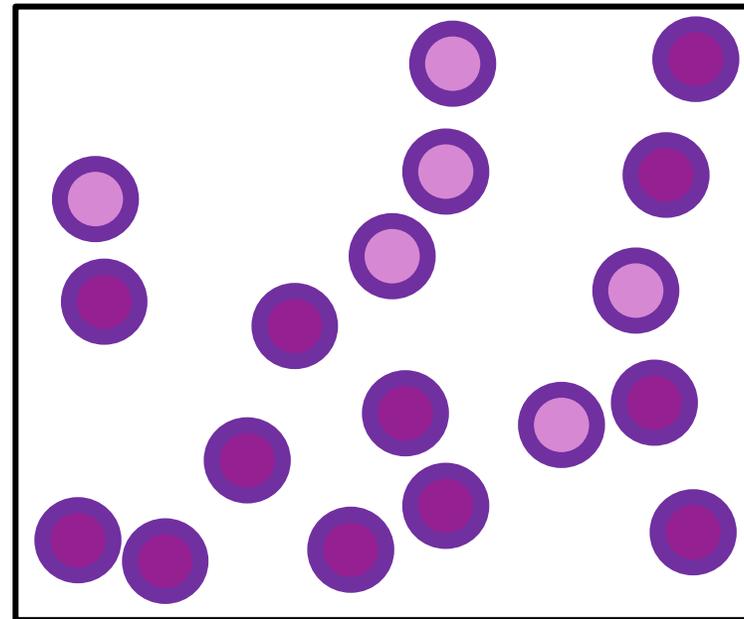


Quantité d'élément chimique (μg)
par gramme de roche (ppm)

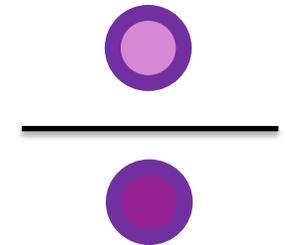
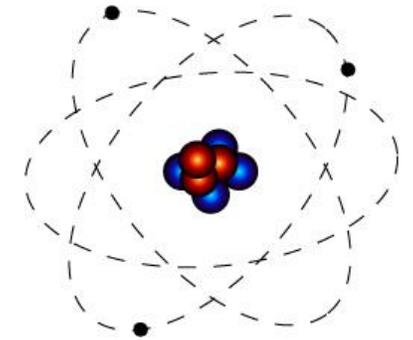


Compositions isotopiques

Isotopes : Atomes qui possèdent le même nombre de protons mais des nombres de neutrons différents dans leur noyau



Pour un élément chimique donné:
rapport d'un isotope sur un autre
(δ ‰ ou ϵ pour 10 000)



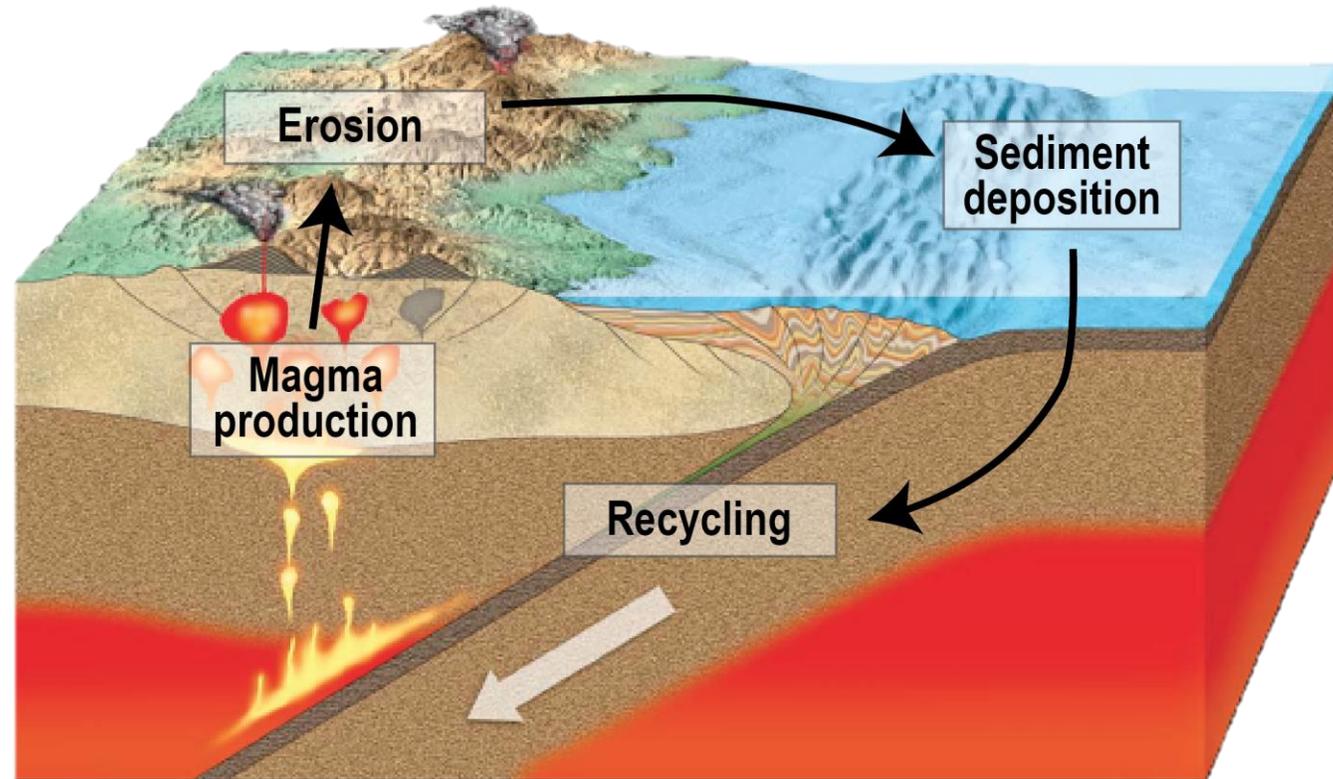
COMPOSITIONS ISOTOPIQUES

Les isotopes d'un même élément n'ont pas les propriétés physico-chimiques (masse, liaisons chimiques, etc.)

→ Fractionnement par les processus cosmochimiques, magmatiques, sédimentaires



Nucléosynthèse primordiale,
stellaire, explosive

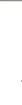
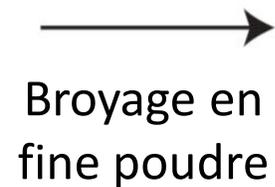
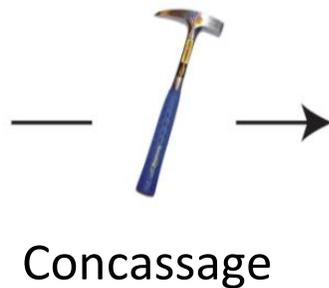


Fusion et cristallisation des magmas, altération des roches, évaporation/condensation, réactions oxydo-réductrices, etc.

Les isotopes peuvent être radioactifs ou radiogéniques

→ Datation des roches et minéraux

ANALYSES CHIMIQUES DES ROCHES ET MINÉRAUX



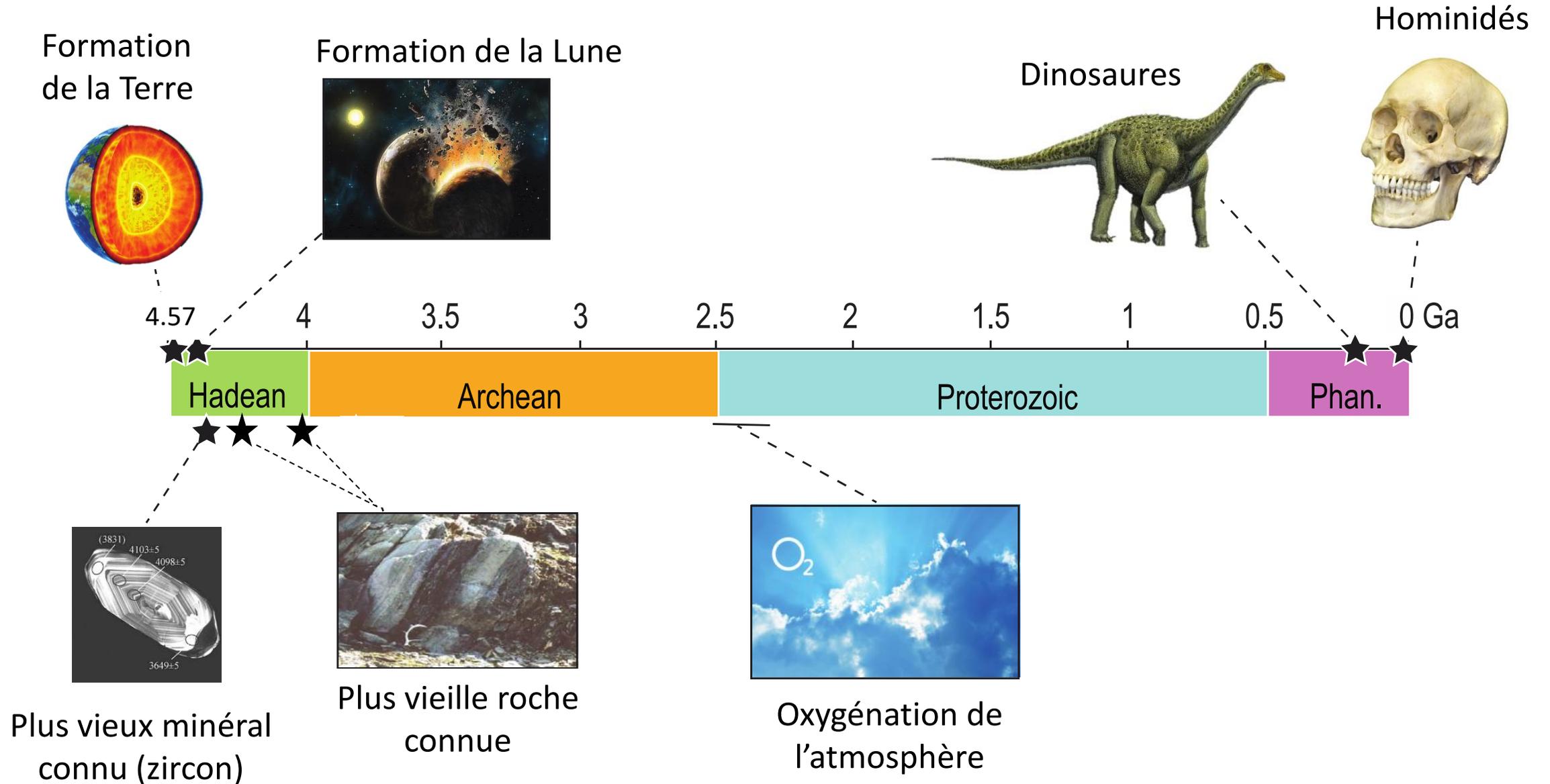
Dissolution des roches avec des acides et séparation des éléments chimiques d'intérêt en salle « blanche »



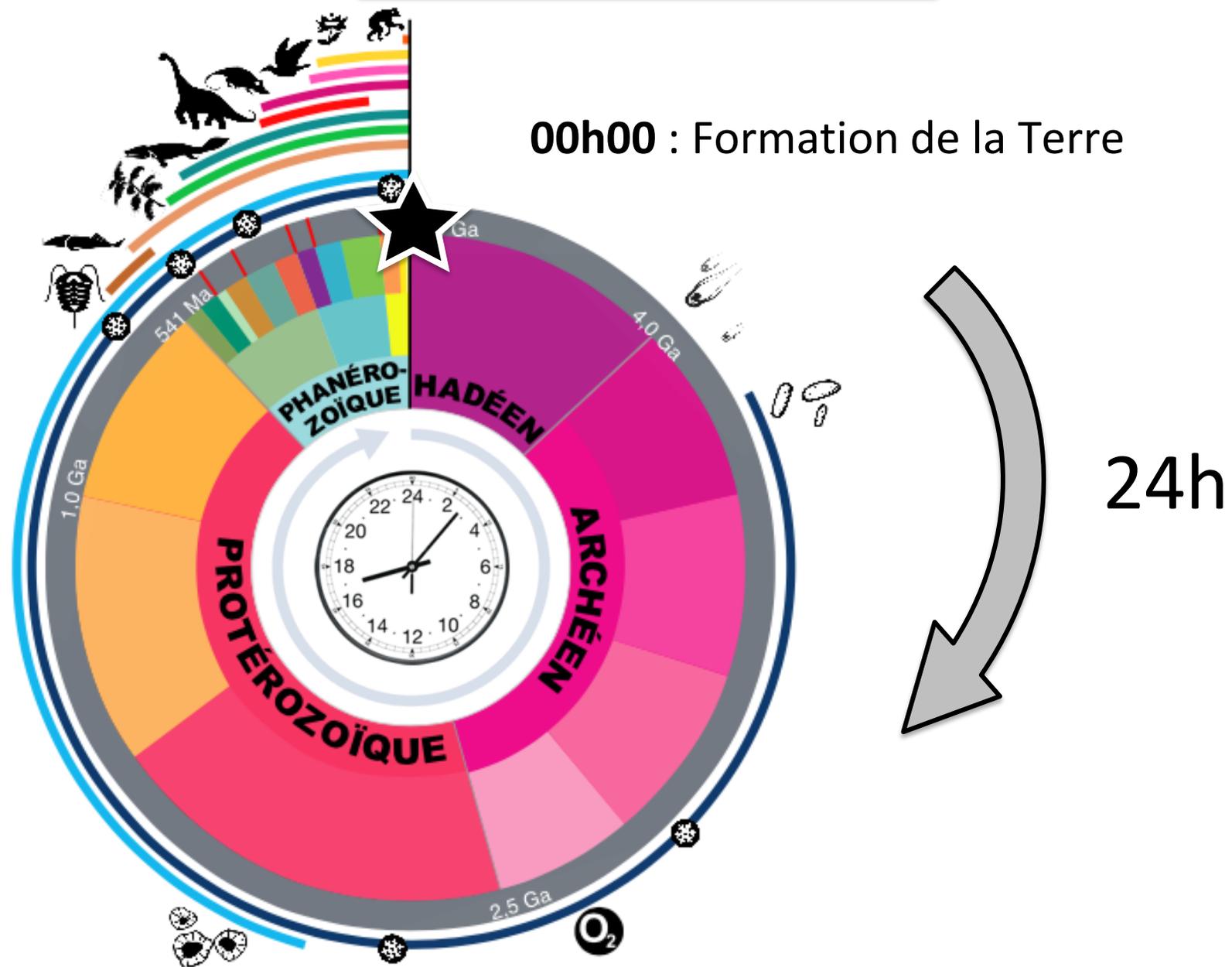
Analyses des **concentrations et compositions isotopiques** (mesures de pointe sur spectromètre de masse)



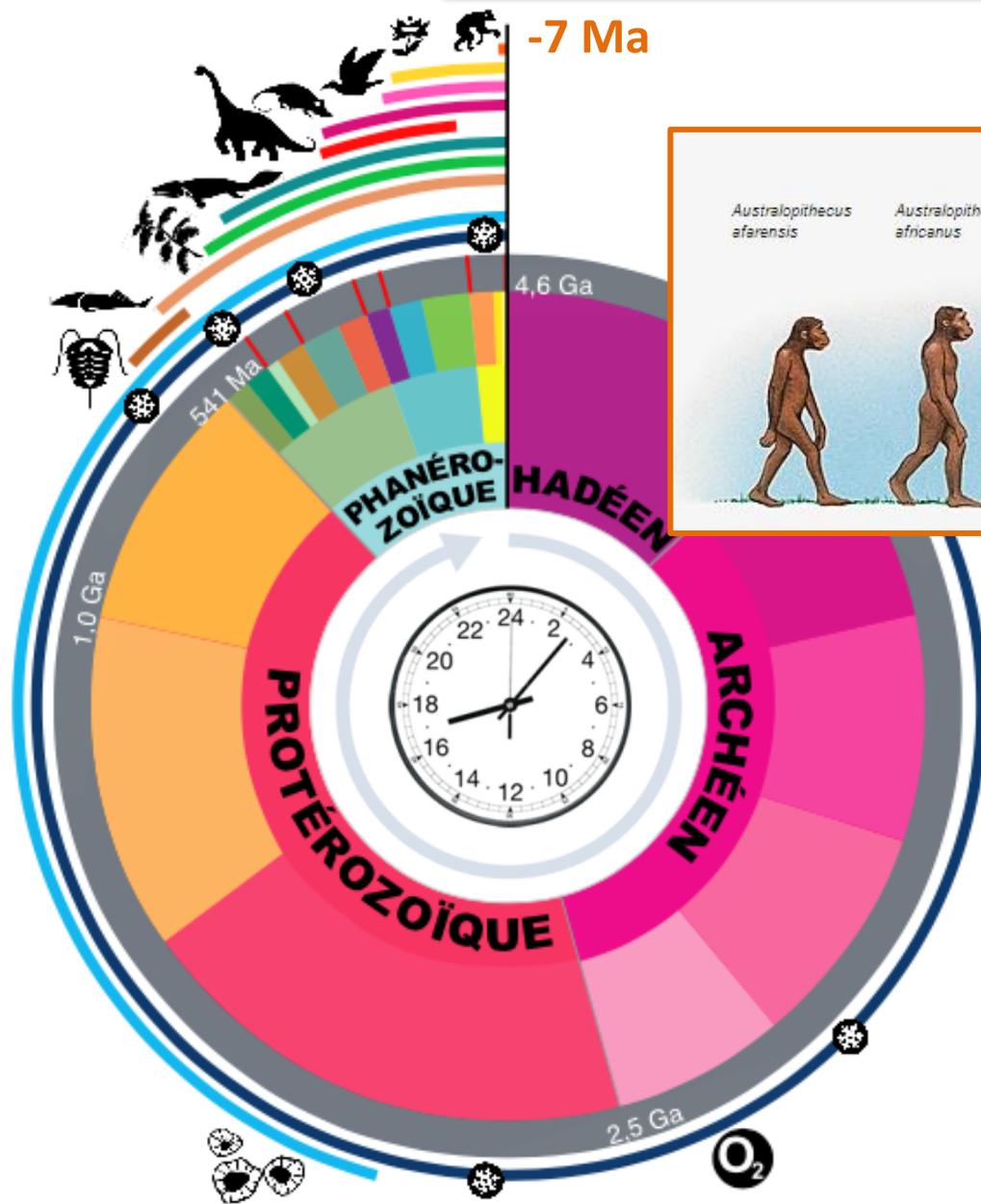
L'ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES



L'ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES

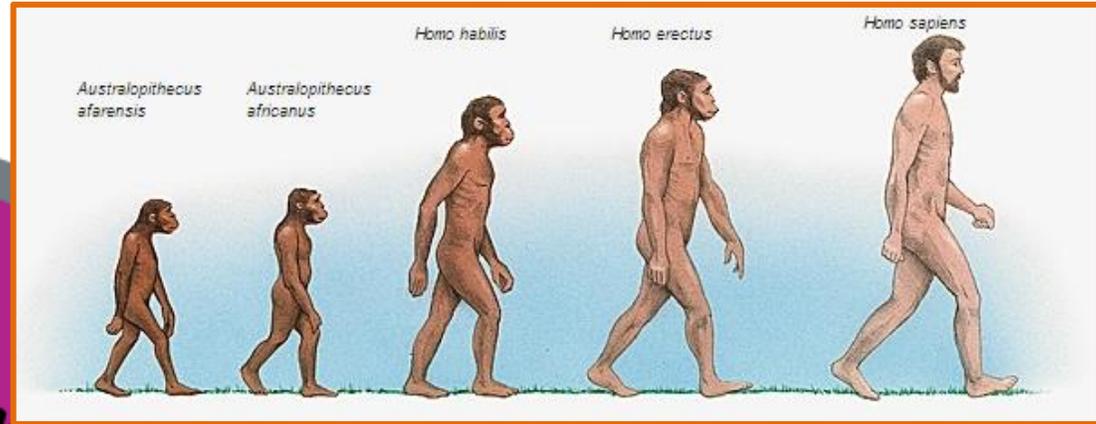


L'ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES



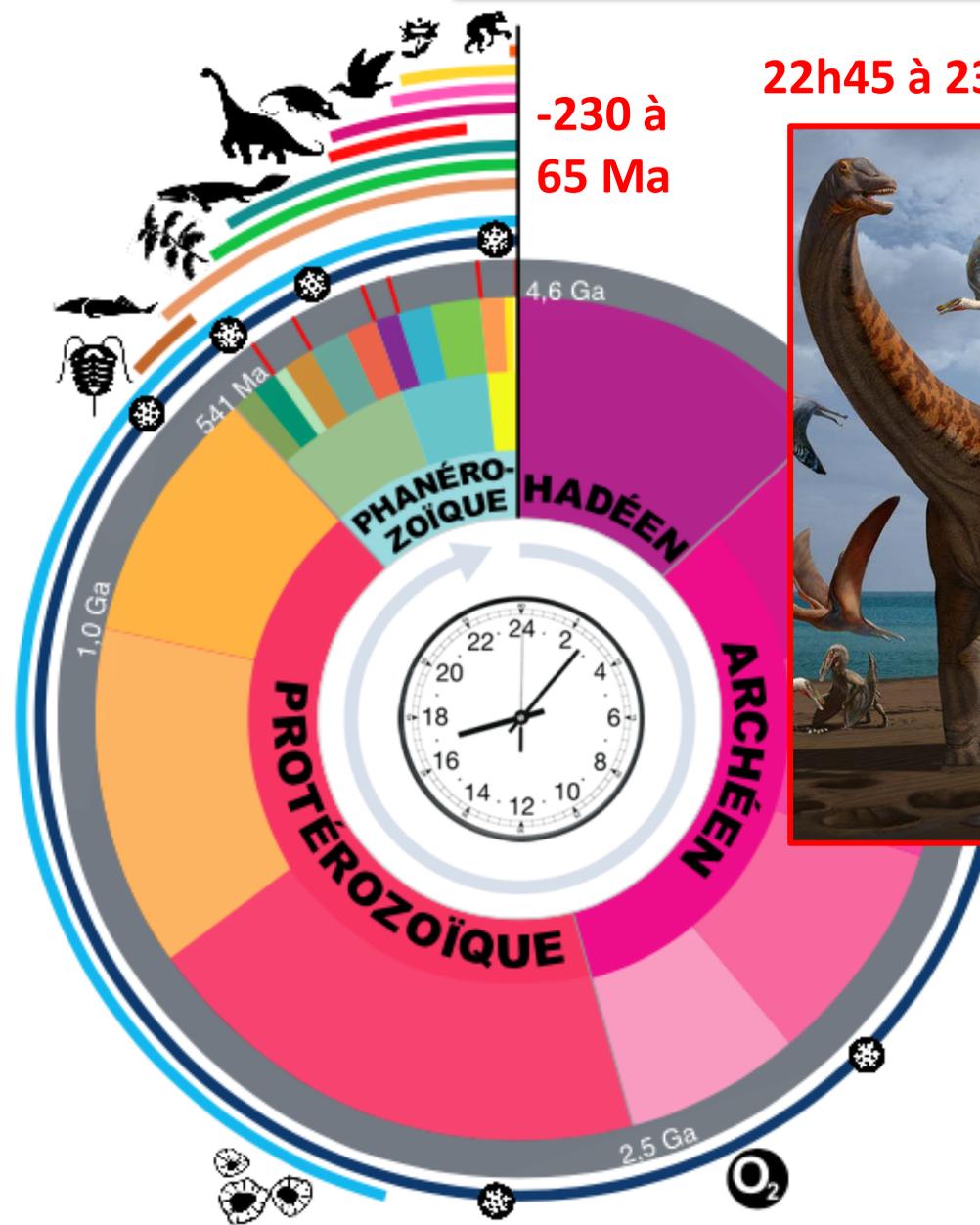
-7 Ma

23h58: Apparition des hominidés



23h59:56s : Homo sapiens (-200 000 ans)

L'ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES

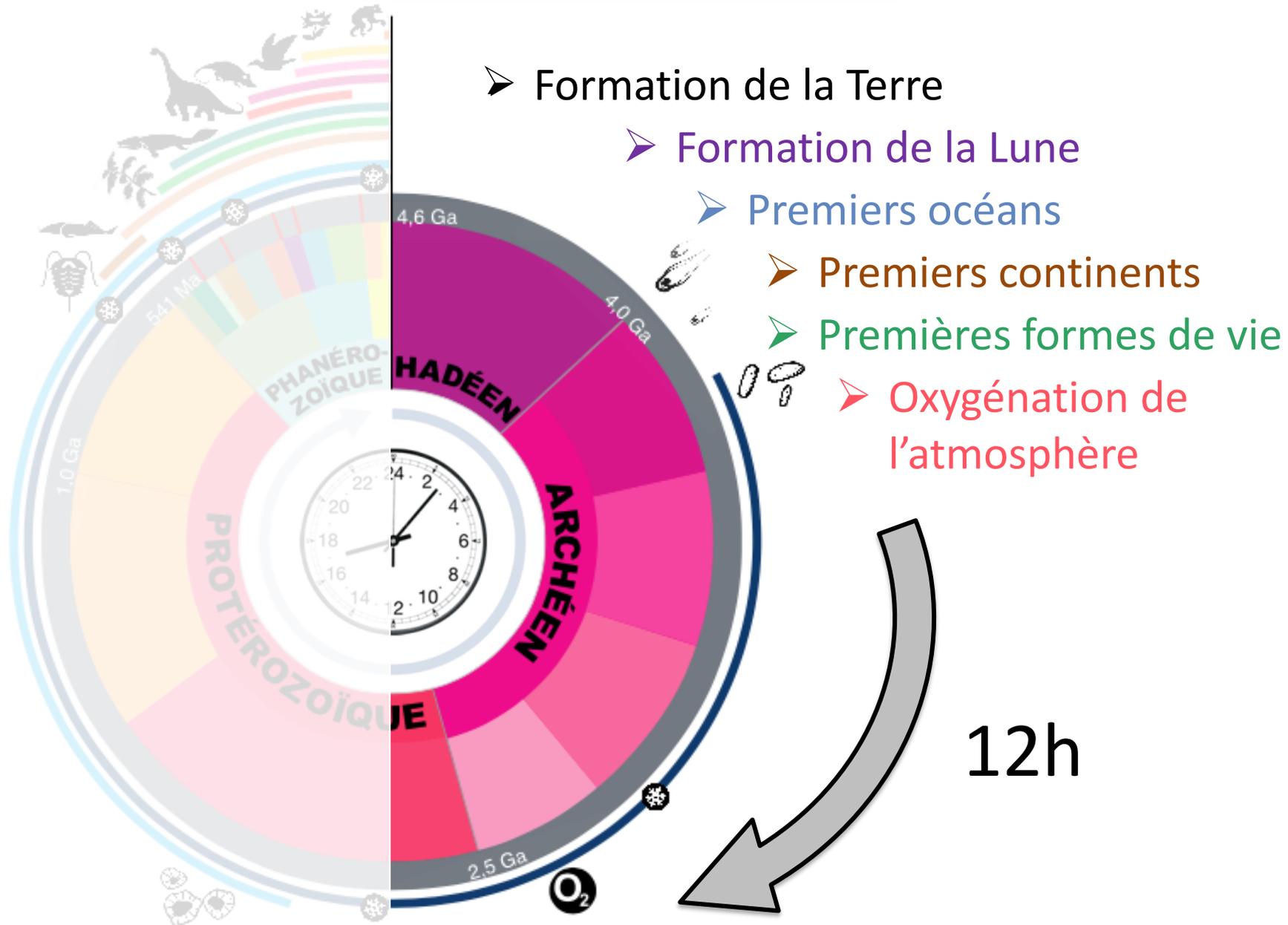


-230 à
65 Ma

22h45 à 23h40 : Période de vie des dinosaures



HISTOIRE DE NOTRE PLANÈTE TERRE



➤ Formation de la Terre

➤ Formation de la Lune

➤ Premiers océans

➤ Premiers continents

➤ Premières formes de vie

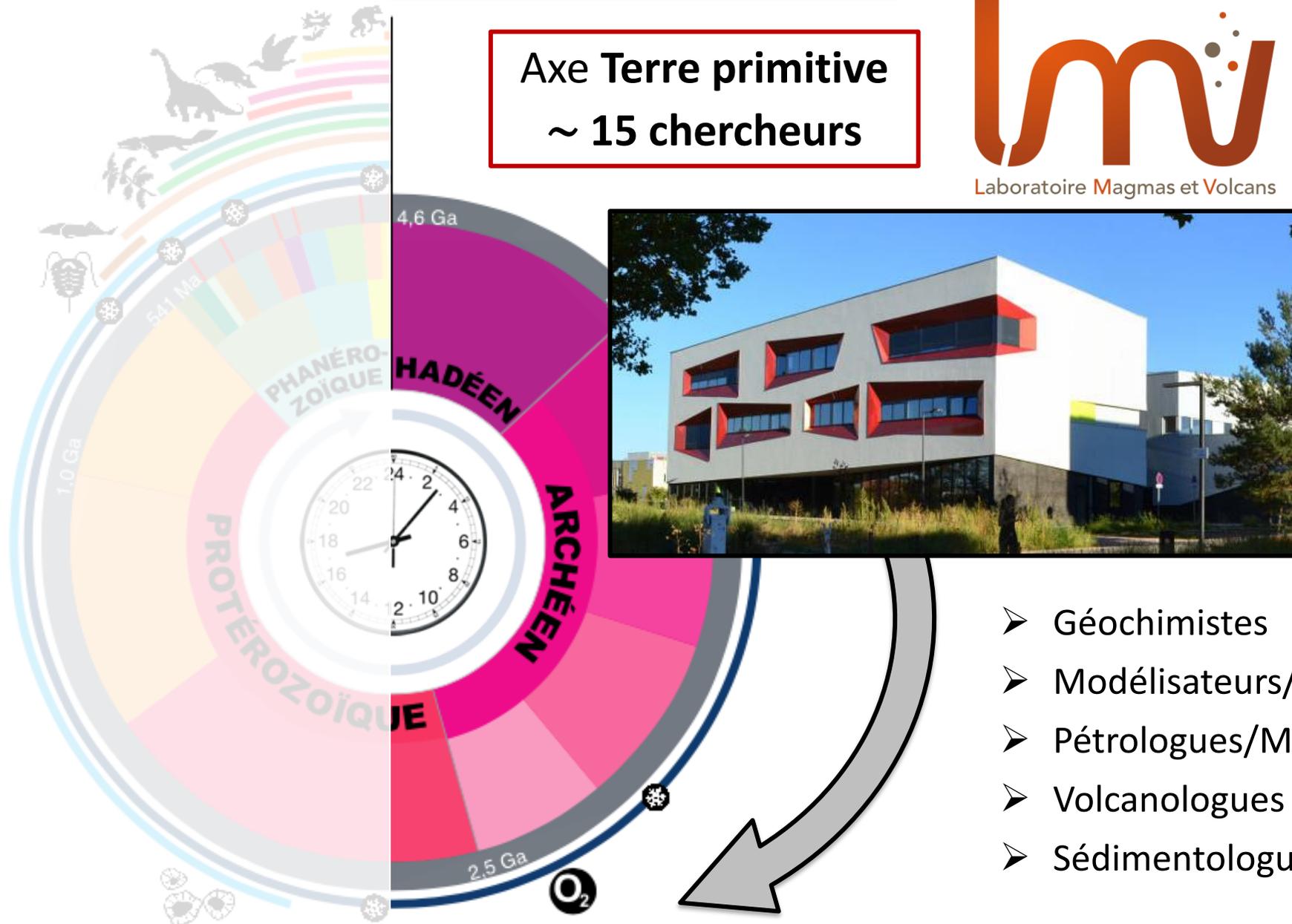
➤ Oxygénation de l'atmosphère

12h

HISTOIRE DE NOTRE PLANÈTE TERRE

Axe Terre primitive
~ 15 chercheurs

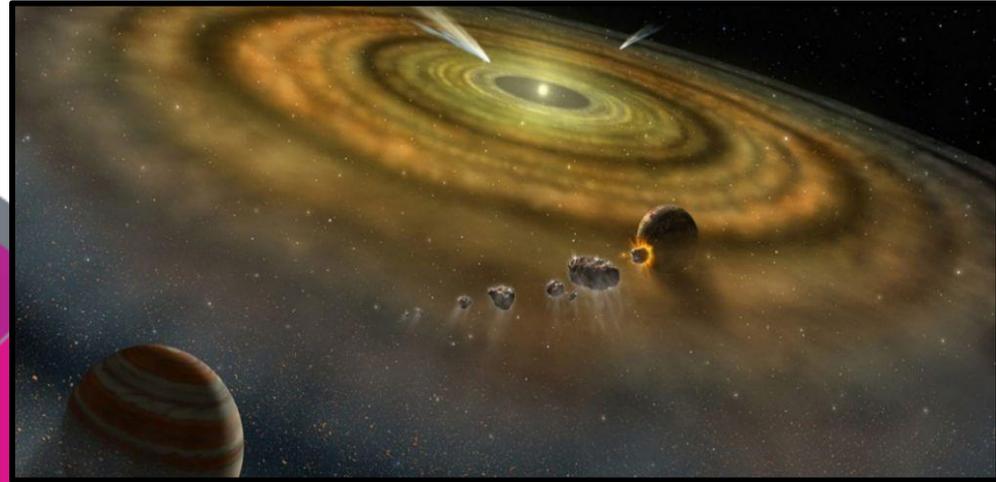
lmv
Laboratoire Magmas et Volcans



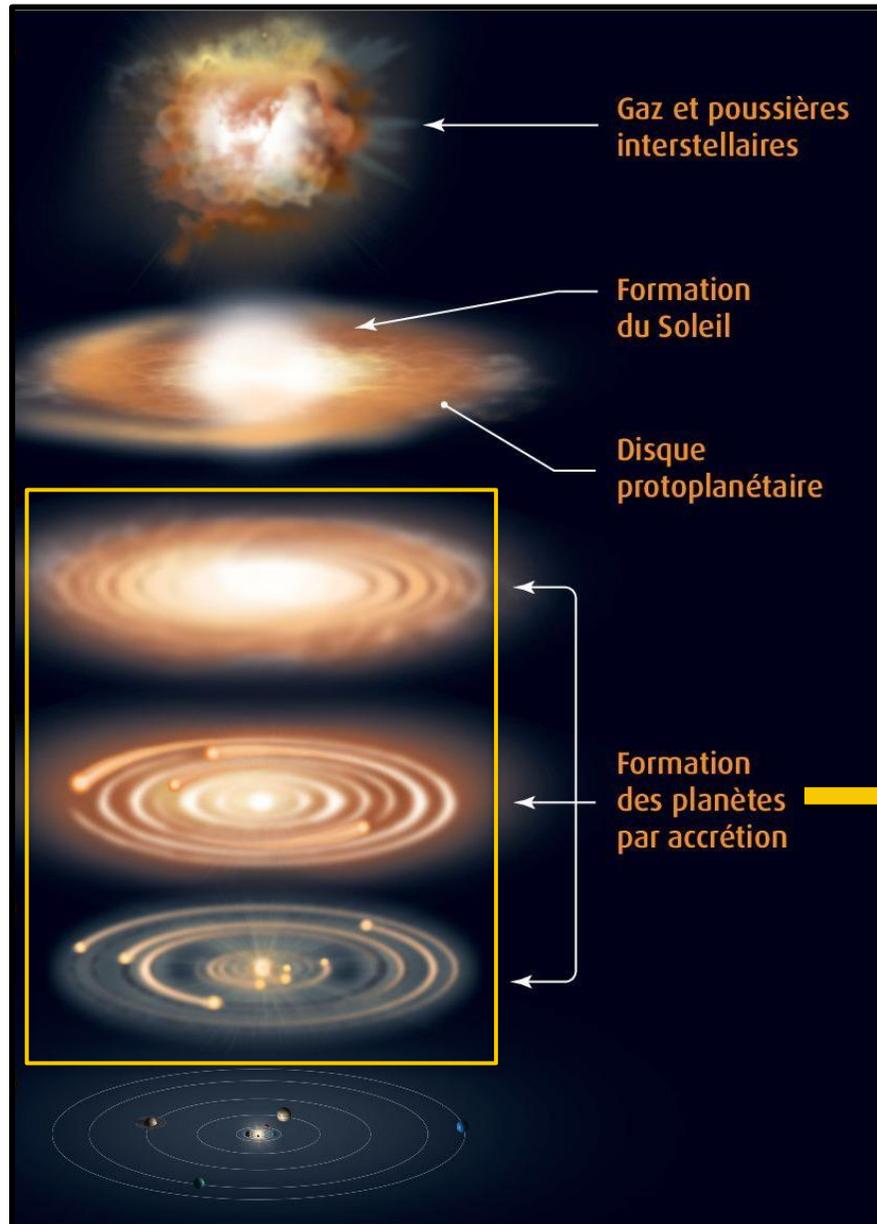
HISTOIRE DE NOTRE PLANÈTE TERRE



00h00: Formation de la Terre



FORMATION DE LA TERRE IL Y A 4,57 Ga

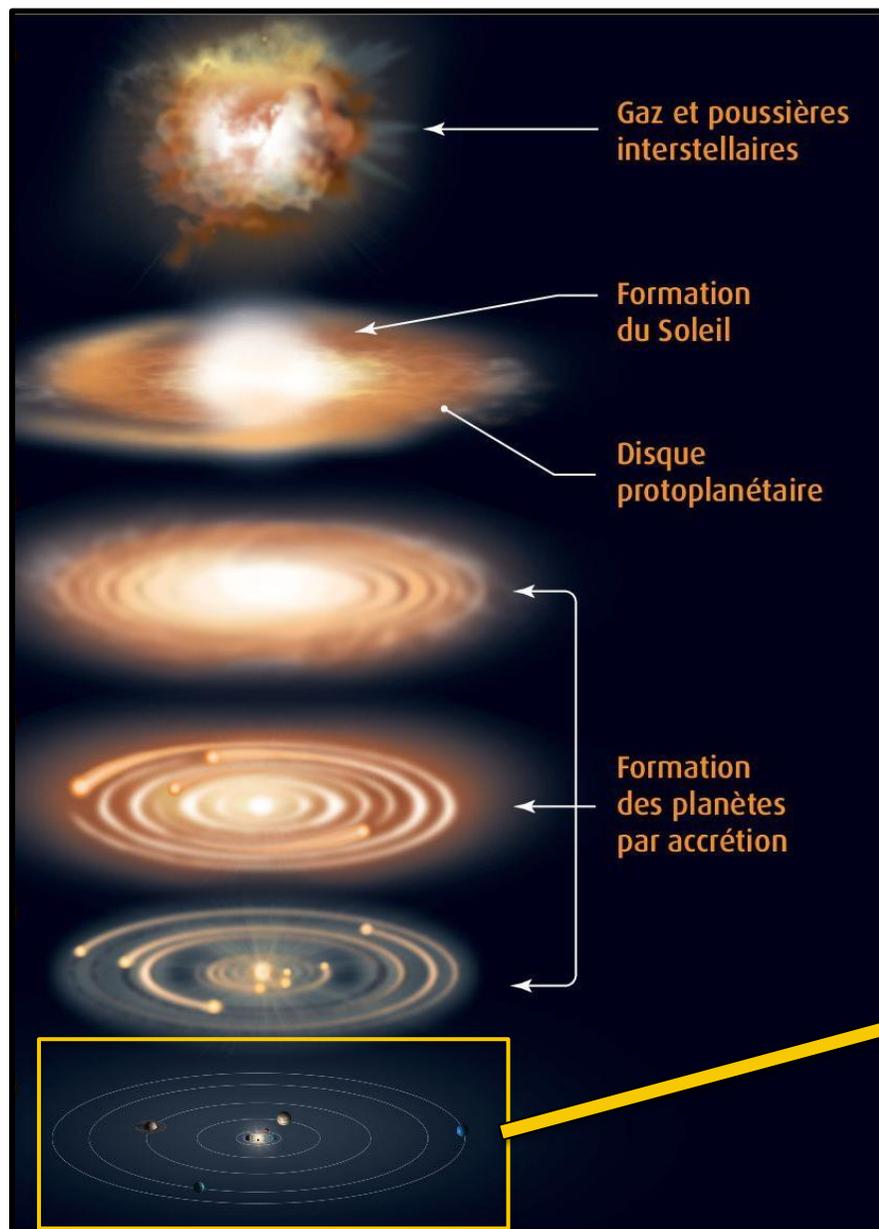


Formation du système solaire en 10-15 Ma ($\sim 3-5$ minutes/24h)

Les planètes se forment par accrétion de “blocs primordiaux”.

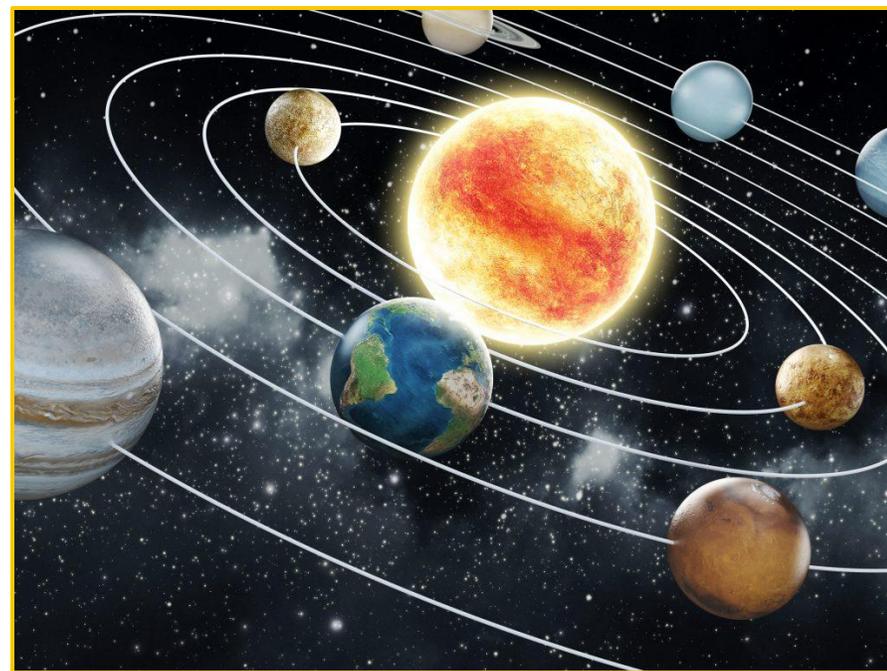


FORMATION DE LA TERRE IL Y A 4,57 Ga

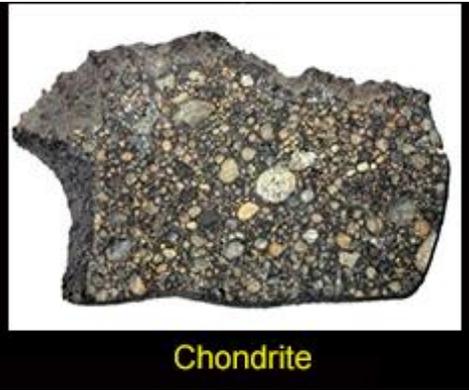


Formation du système solaire en 10-15 Ma ($\sim 3-5$ minutes/24h)

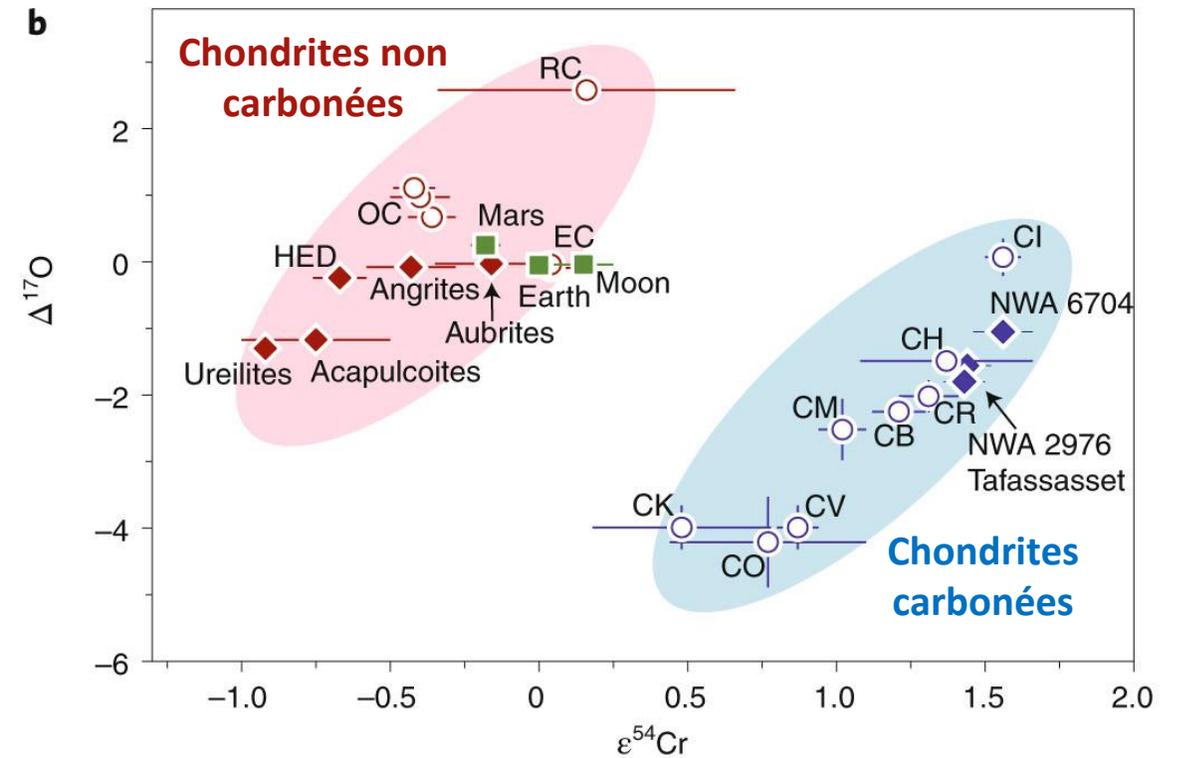
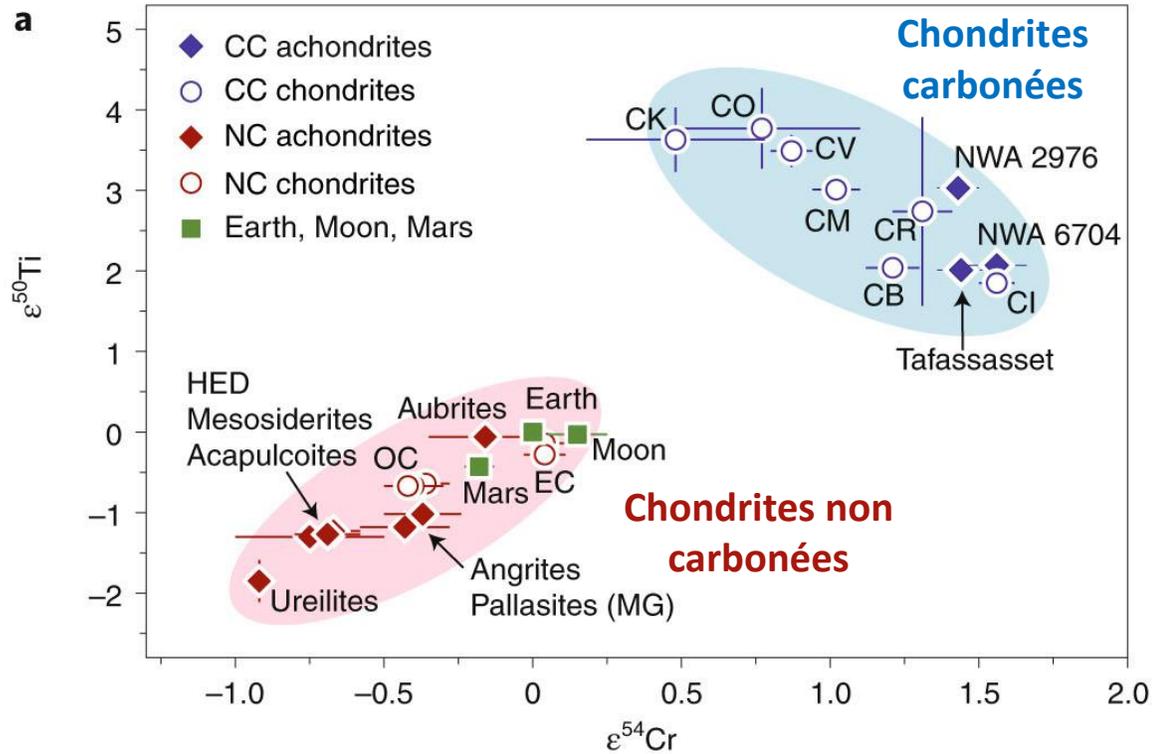
Formation des planètes



ANALYSE DES MÉTÉORITES – ORIGINES DE LA TERRE



Analyses de la composition isotopique des météorites
 → Comparaison avec les roches terrestres



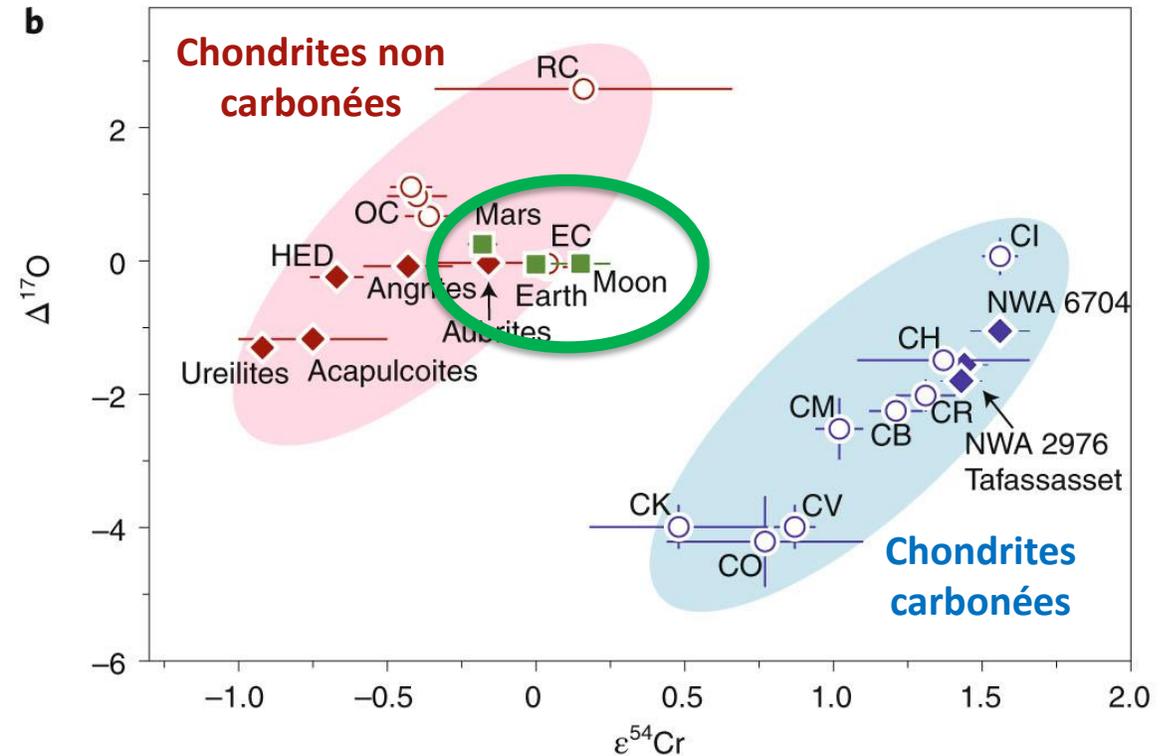
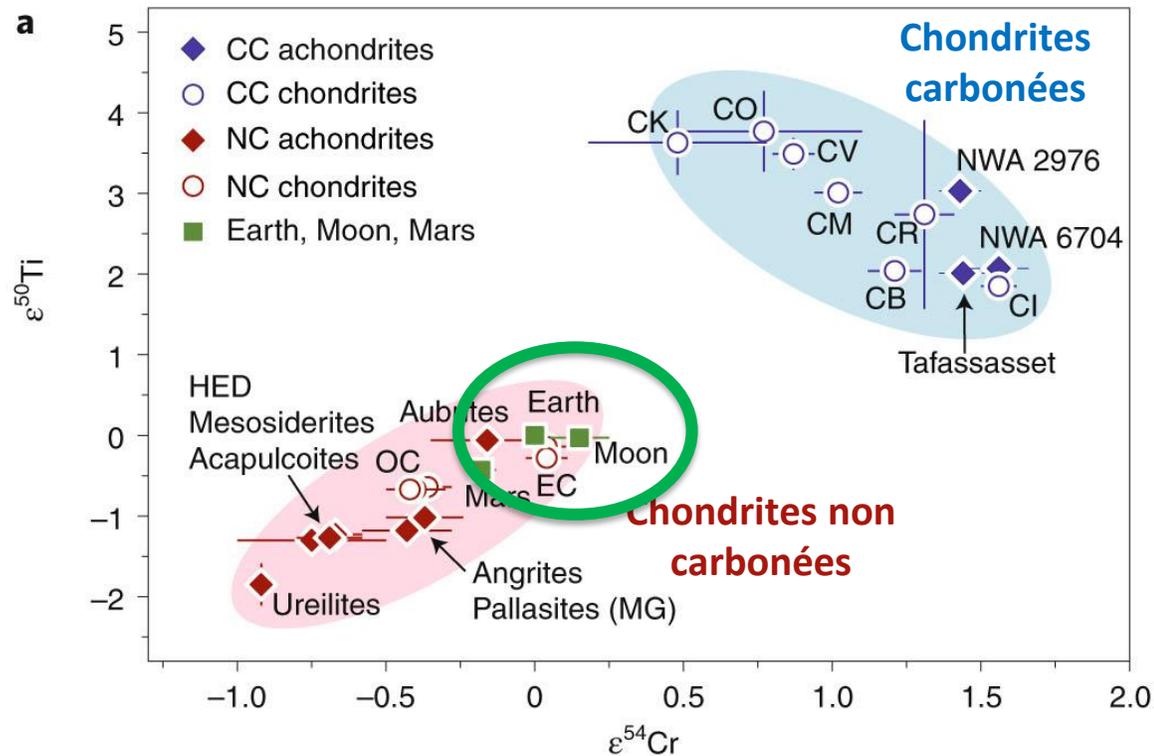
ANALYSE DES MÉTÉORITES – ORIGINES DE LA TERRE



Analyses de la composition isotopique des météorites
 → Comparaison avec les roches terrestres

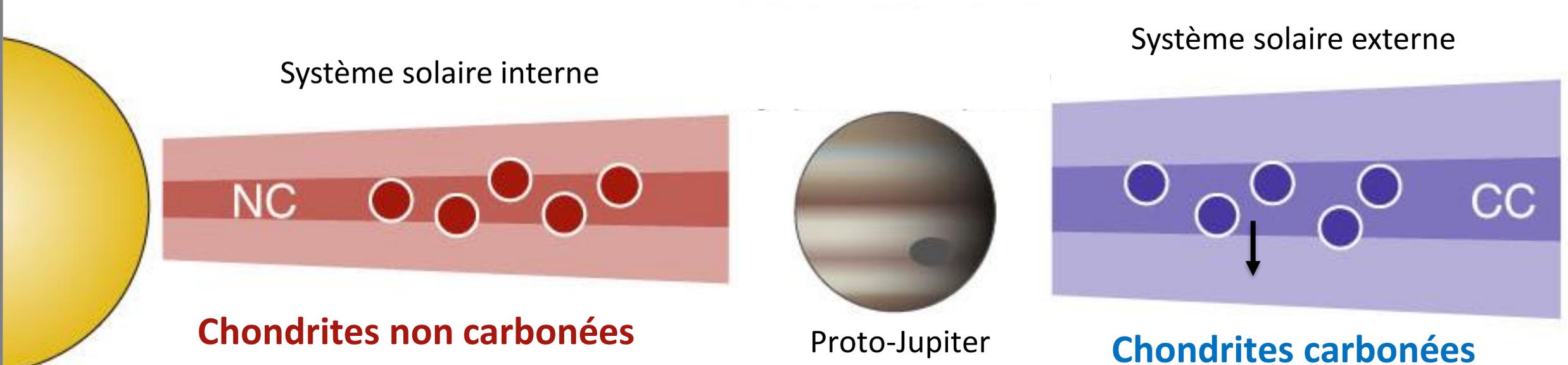


La Planète Terre s'est formée à partir de **chondrites non carbonées de type EC** (chondrites à enstatite)



ANALYSE DES MÉTÉORITES – ORIGINES DE LA TERRE

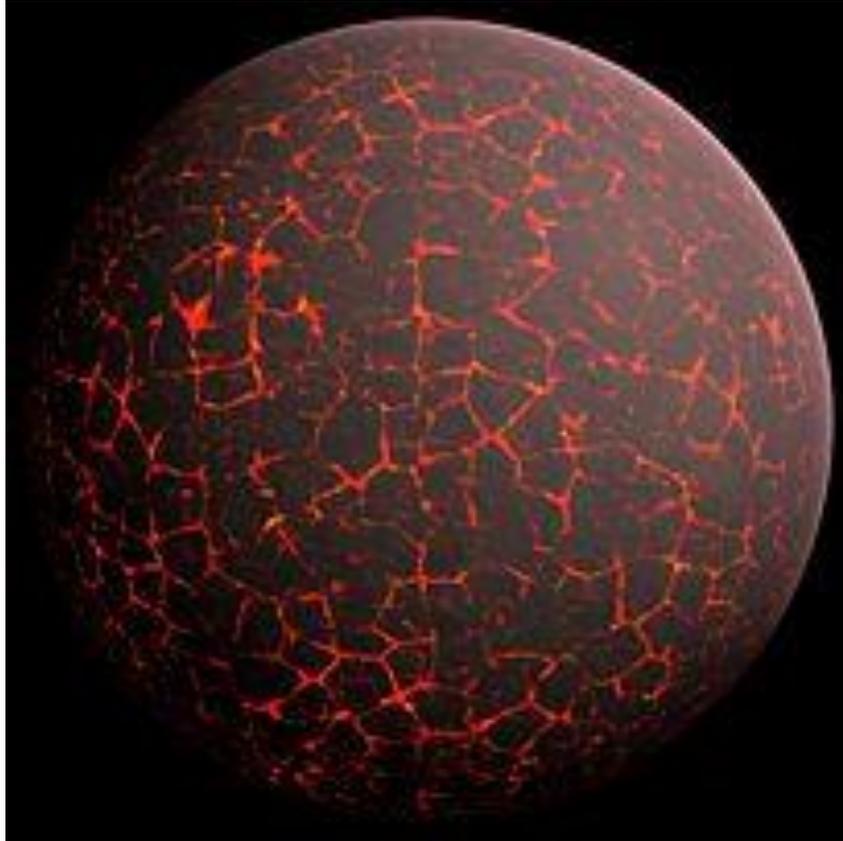
Premiers moments de vie de notre système solaire



La formation très rapide de Jupiter empêche une répartition homogène des “blocs primordiaux”.
→ La Terre s’est formée dans le système solaire interne (pas de migration).

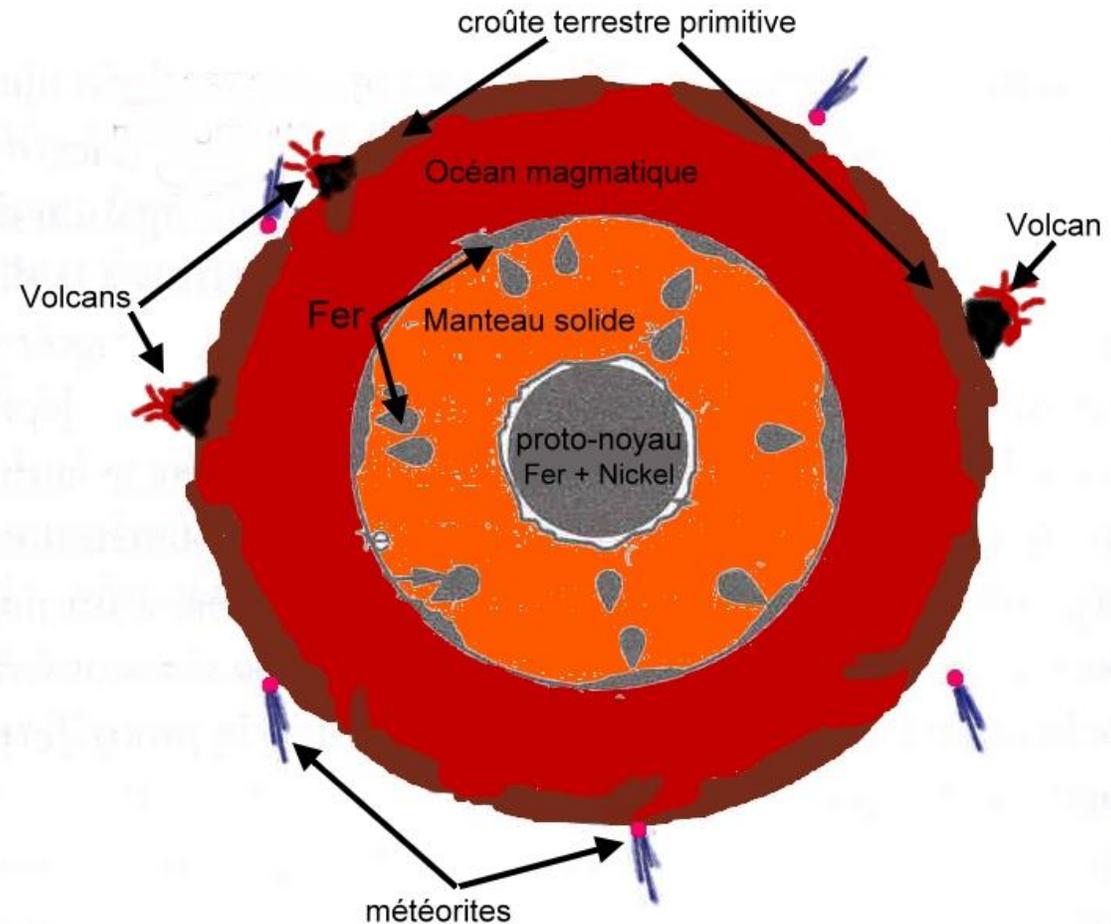
DIFFÉRENTIATION DE LA TERRE – FORMATION DU NOYAU

La Terre au début de son histoire

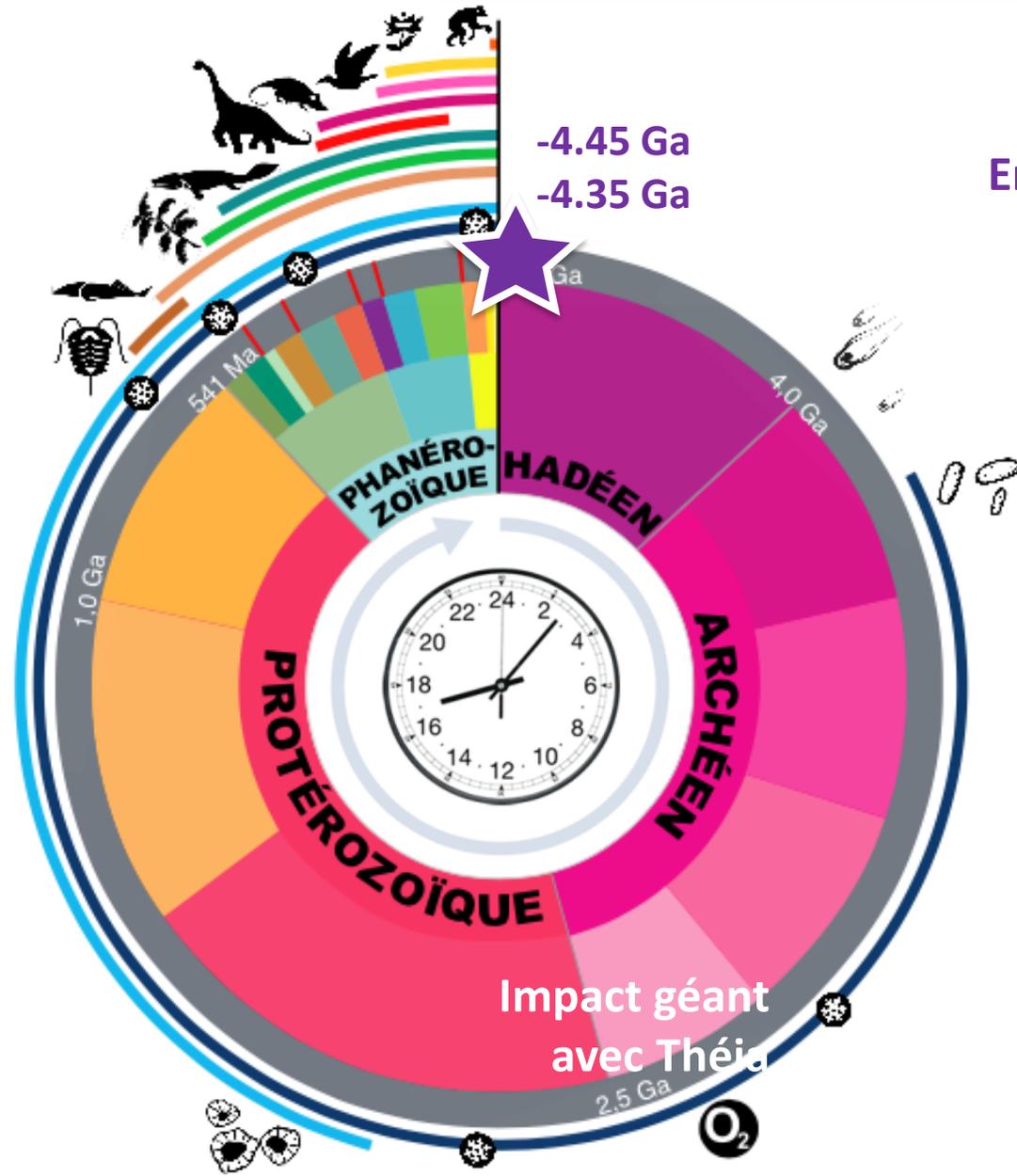


Une fine croûte terrestre se forme à la surface = croûte très instable

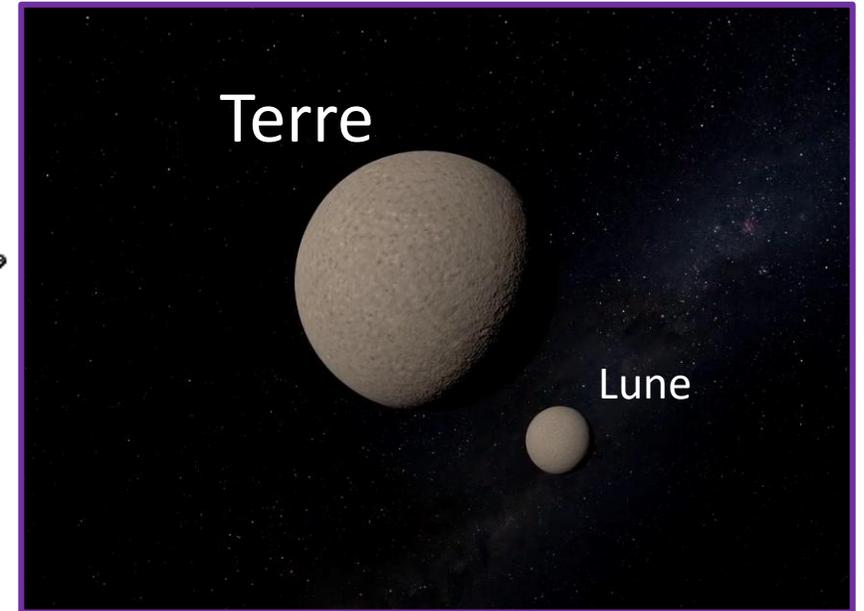
00h10 : Formation du noyau, du manteau et de la croûte terrestre primitive (4.52-4.47 Ga)



FORMATION DE LA LUNE



Entre 00h18 et 00h30 : Formation de la Lune

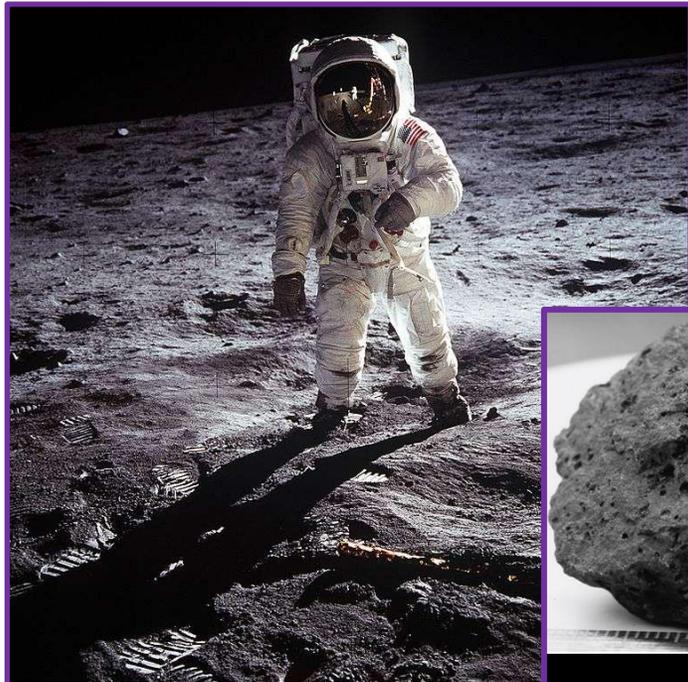


FORMATION DE LA LUNE – MISSIONS APOLLO (1969-1972)

280 kg de roches/sols lunaires
ramenés en 6 missions

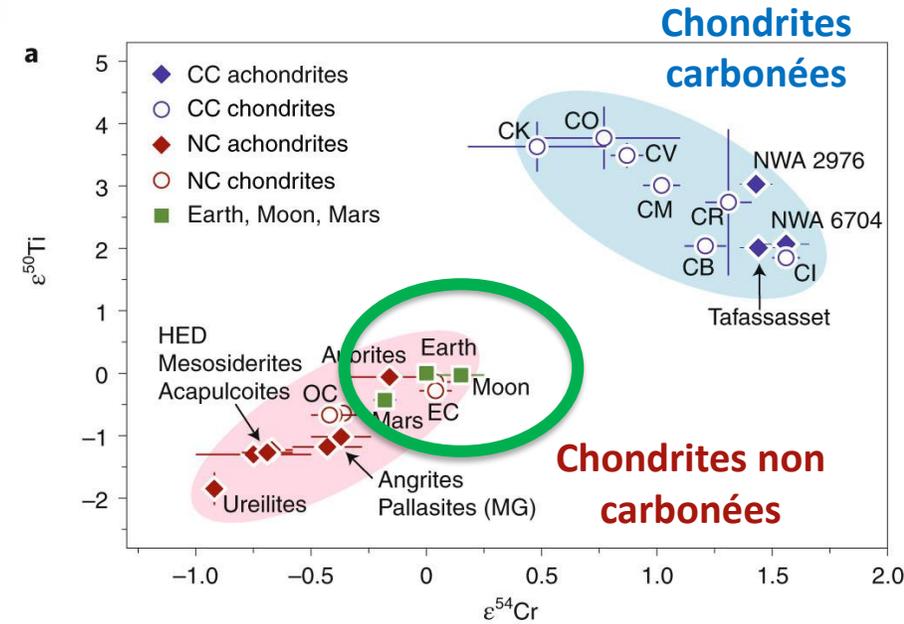
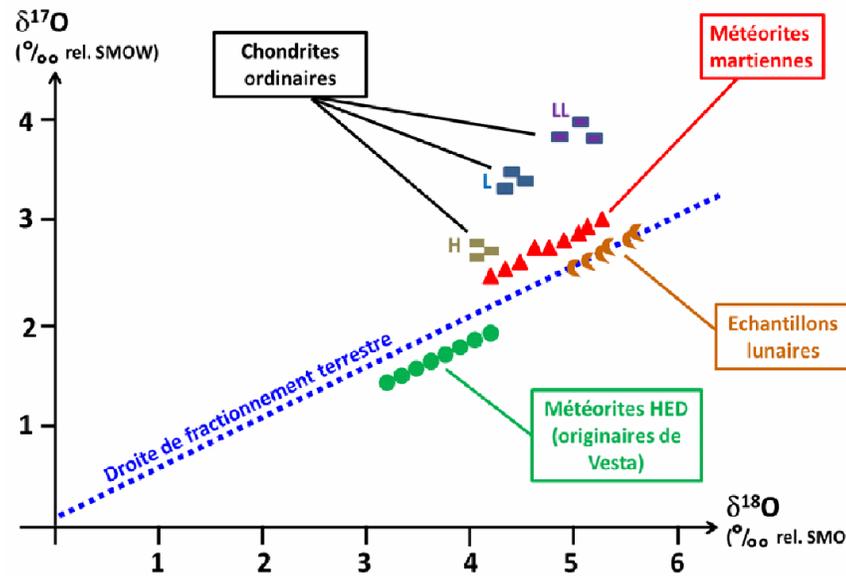


Analyses chimiques et
isotopiques comparatives de
roches lunaires et terrestres



Basalte Apollo 11 (#10069)

Compositions isotopiques de l'Oxygène (O), du Titane (Ti), et du Chrome (Cr)



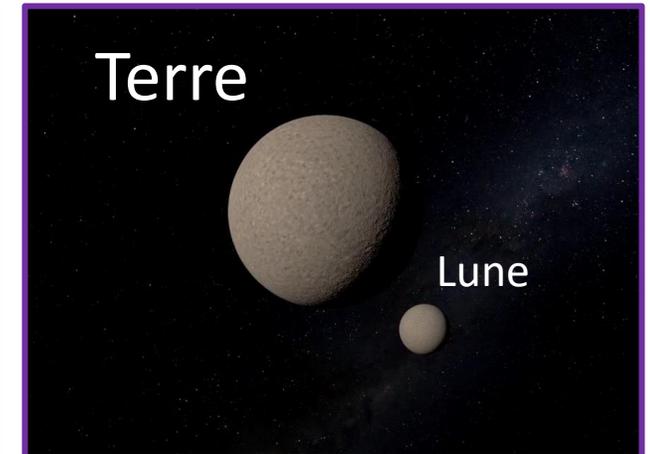
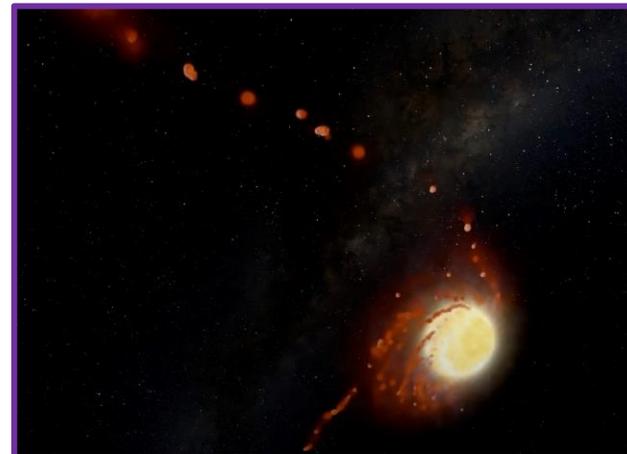
La Terre et la Lune ont les mêmes compositions
chimiques → Origine commune

**Argument fort en faveur d'une collision d'une
proto-planète avec la Terre**

FORMATION DE LA LUNE – IMPACT GÉANT



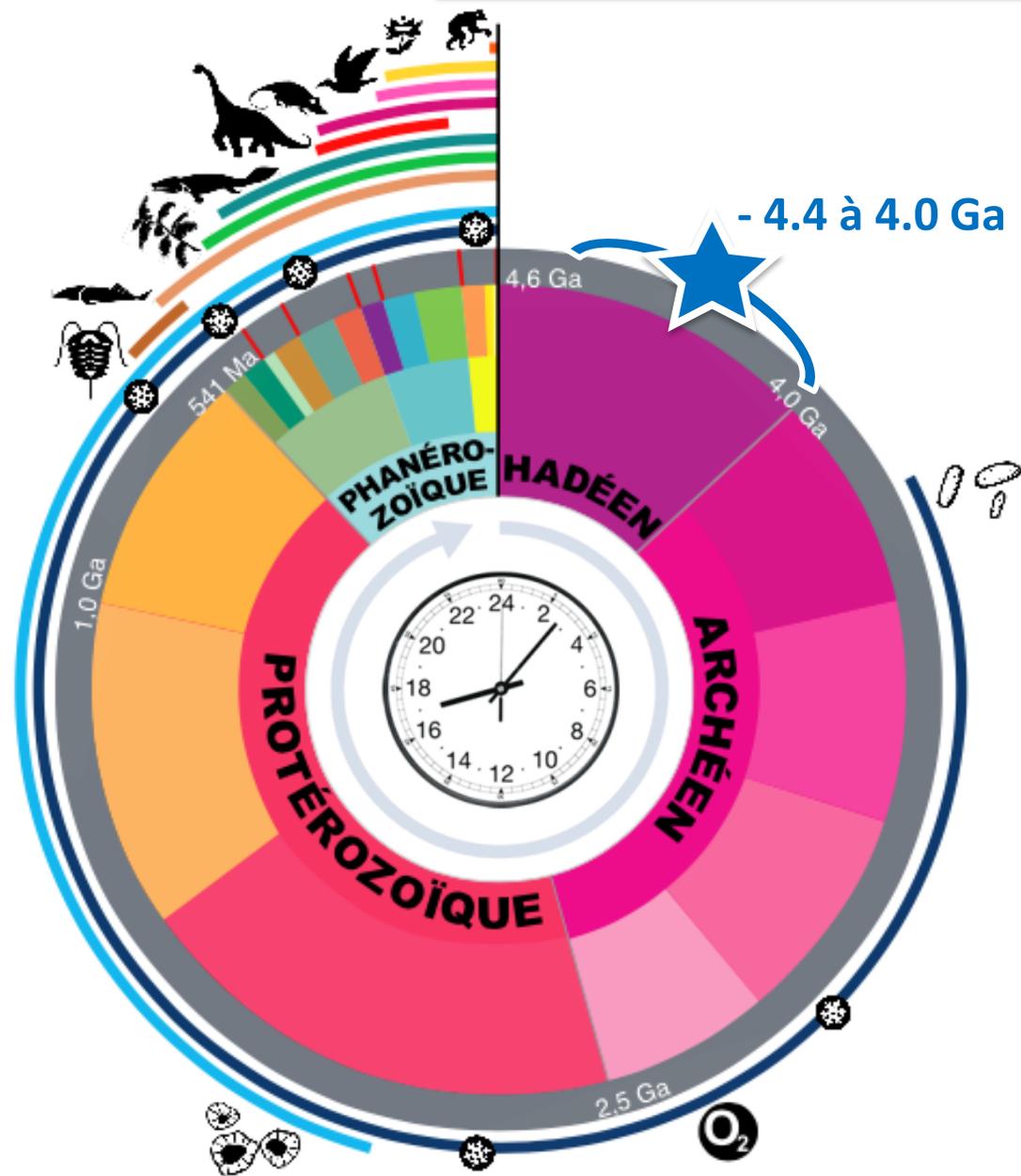
- Collision oblique avec un impacteur de la taille de Mars (Théia)
- Vaporisation des roches Terrestres et de Théia (disque $> 5000^{\circ}\text{C}$) = Homogénéisation des compositions chimiques
- Recondensation des roches
- Formation du système Terre-Lune



FORMATION DE LA LUNE – SIMULATIONS NUMÉRIQUES



REFROIDISSEMENT RAPIDE DE LA TERRE



Entre 00h45 et 03h00 :
Formation des premiers
continents et océans



ZIRCONS : LES PLUS VIEUX MINÉRAUX DU MONDE

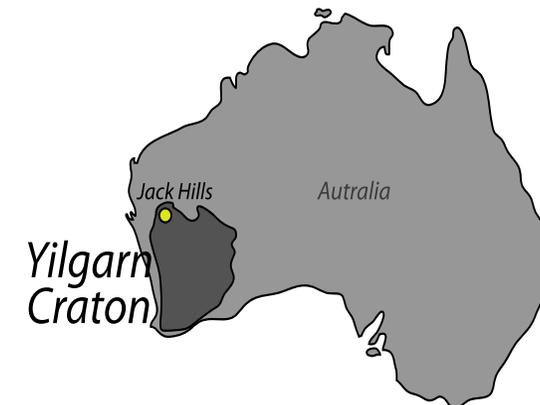
Zircons de Jack Hills, Australie – 4.37 Ga



Autres zircons > 4 Ga

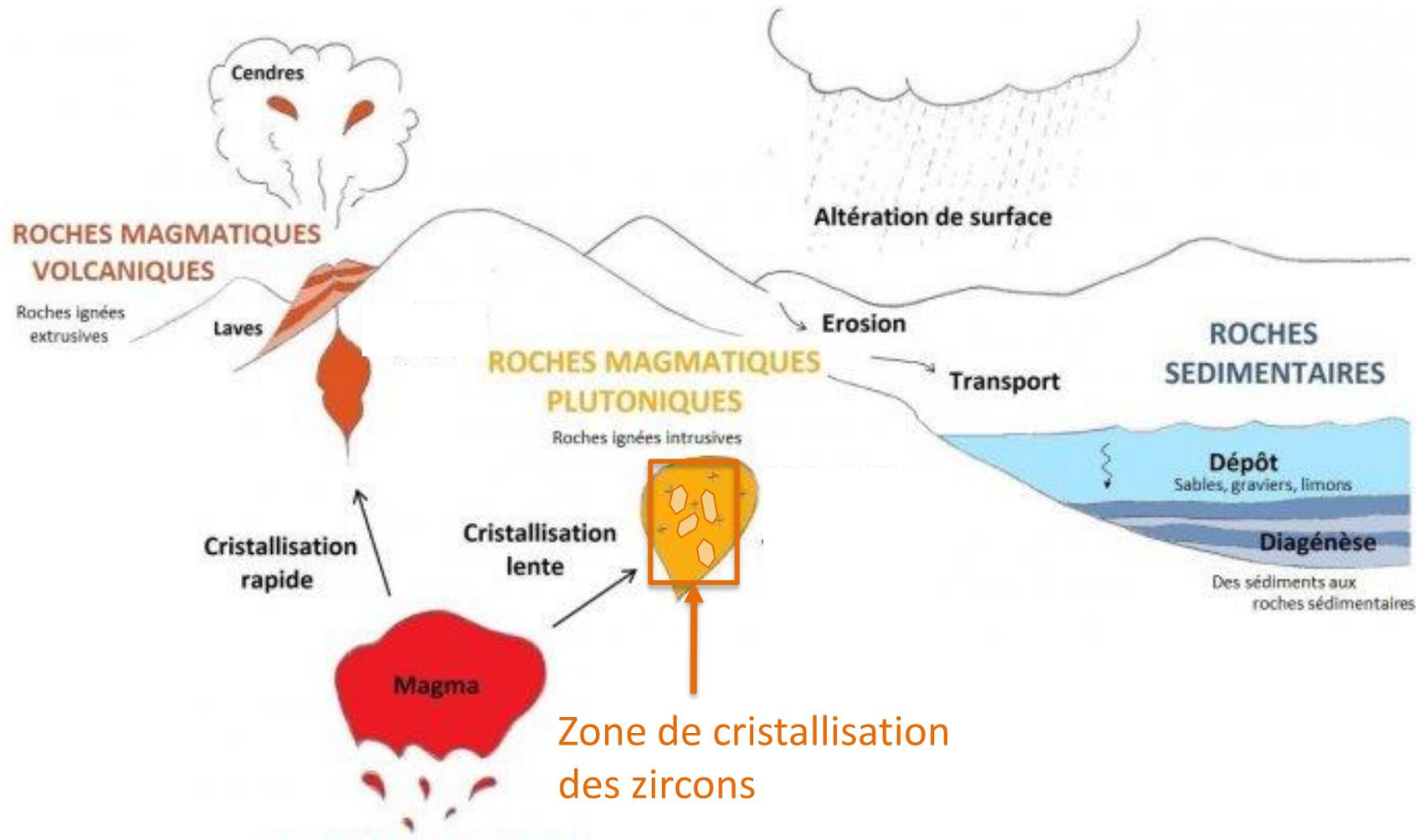
- NW Canada, Acasta – 4.2 Ga
- Afrique du Sud, Barberton – 4.15 Ga
- Brésil, Sao Francisco – 4.1 Ga
- Inde, Singhbhum – 4.1 Ga

Granite



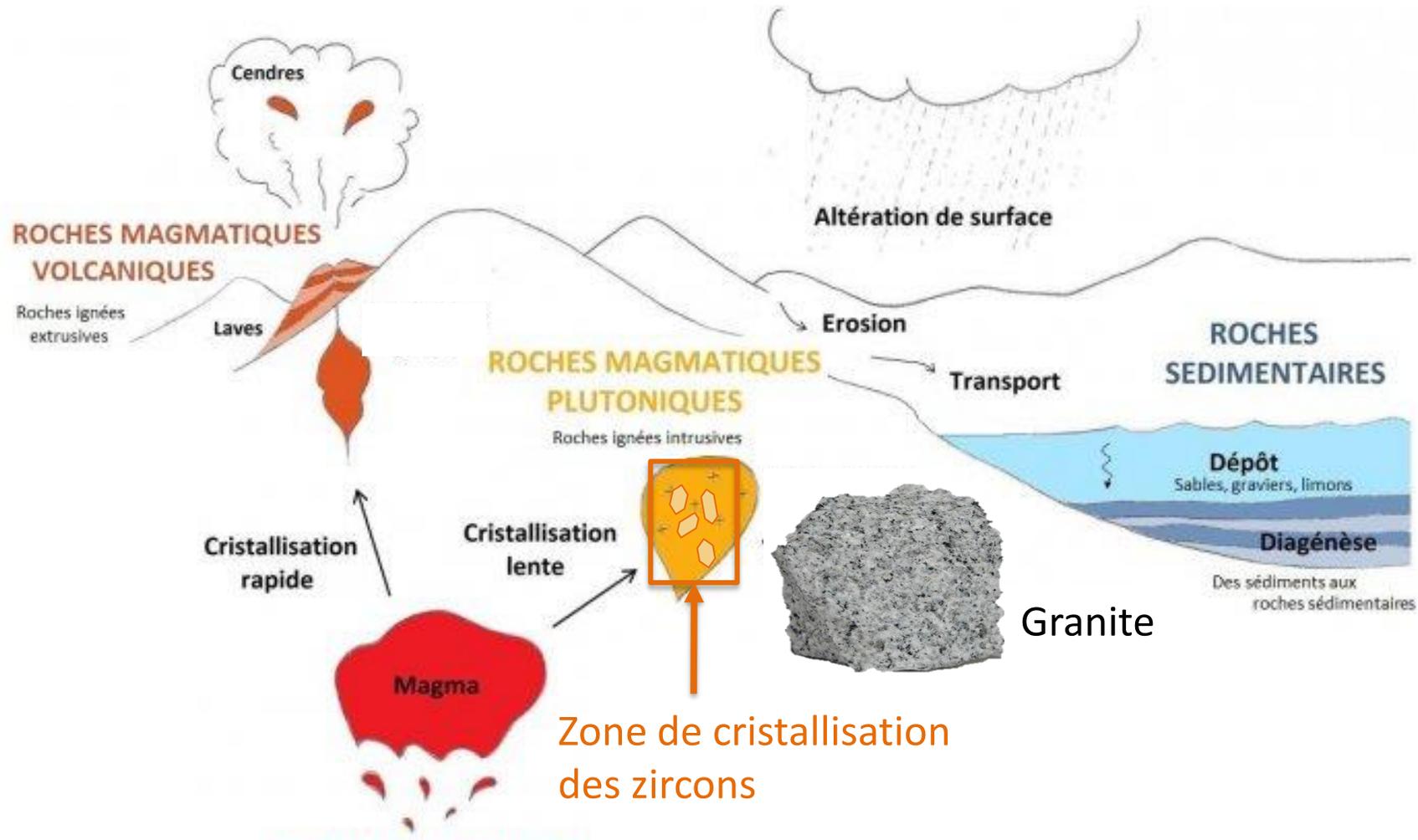
Zircons → Minéraux très résistants = capsules temporelles

ZIRCONS : PRÉSENCE DE CONTINENTS



Présence de zircons > 4 Ga → Présence de continents mais on ne connaît pas leur superficie

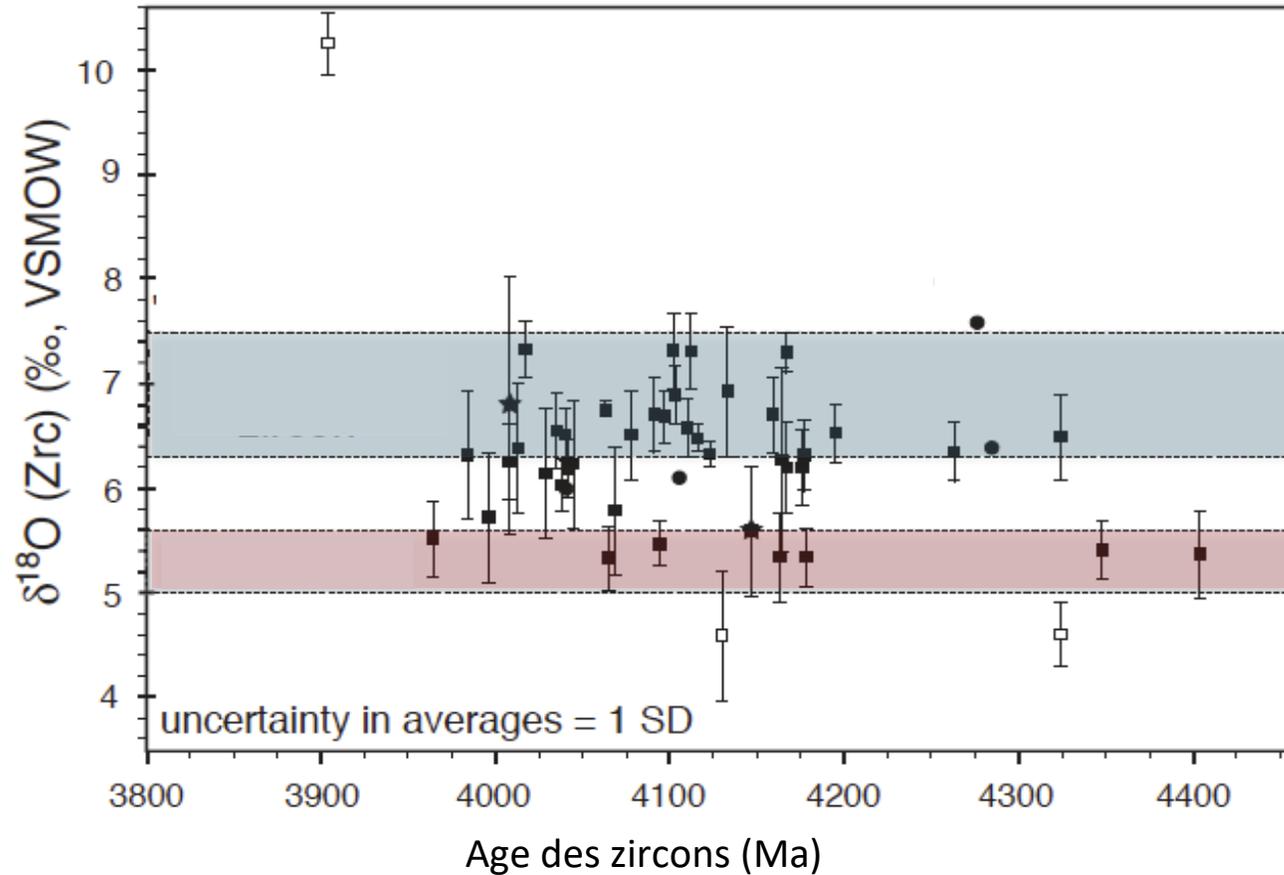
ZIRCONS : PRÉSENCE DE CONTINENTS



Présence de zircons > 4 Ga → Présence de continents mais on ne connaît pas leur superficie

ZIRCONS : PRÉSENCE D'OCÉANS

Compositions isotopiques en oxygène des zircons de Jack Hills, Australie



Présence d'océans liquides sur Terre dès 4,3 Ga

Zircon cristallisé dans un magma ayant interagi avec de l'eau

Zircon "mantellique"



COMMENT DATER LES ROCHES ET LES MINÉRAUX ?



Gneiss d'Acasta, Canada
4,02 Ga



Grès de la Province du
Supérieur, Canada
2,7 Ga

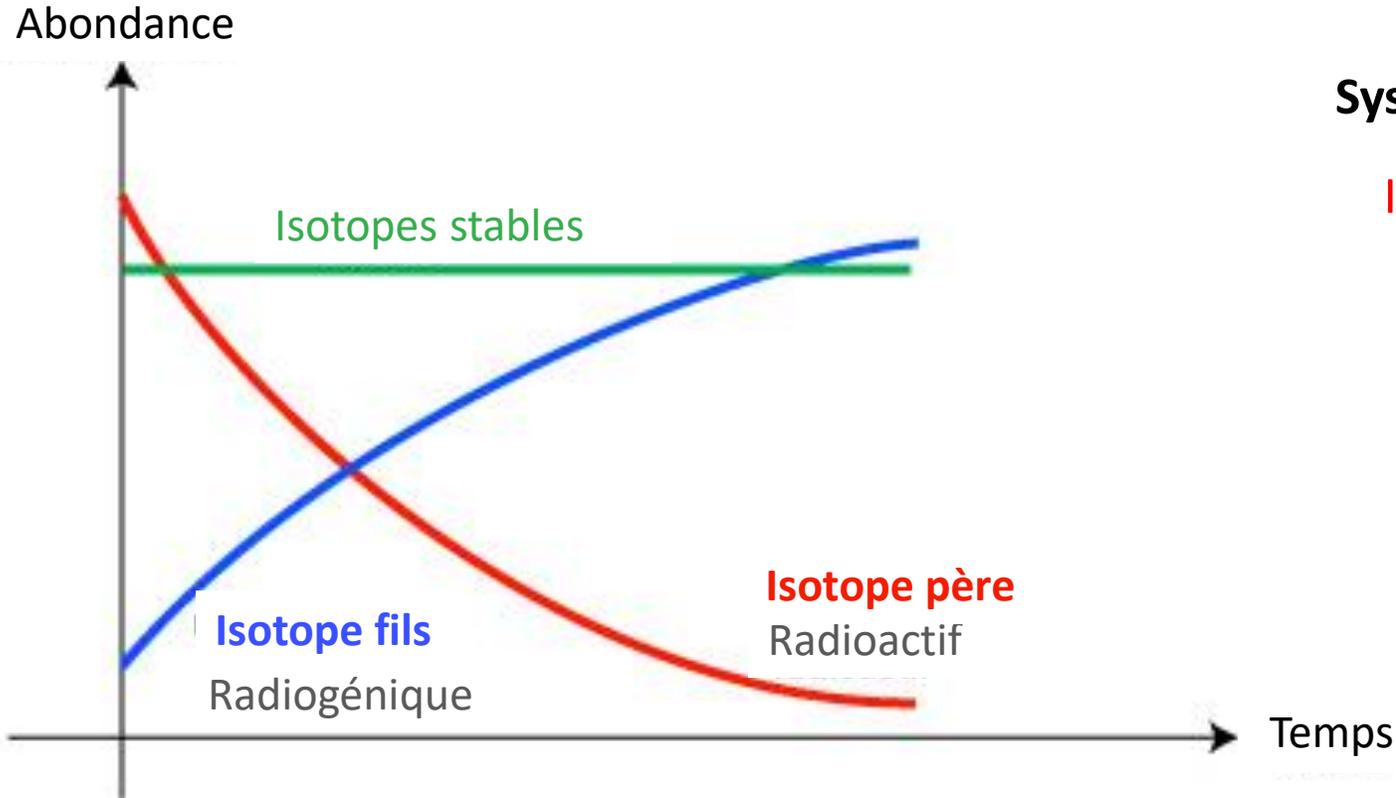


Granite du Massif Central
0,3 Ga

Datation de l'âge de cristallisation ou de formation des roches ou des minéraux

COMMENT DATER LES ROCHES ET LES MINÉRAUX ?

Datation de l'âge de cristallisation ou de formation – Refroidissement ou clôture du système radioactif



Systèmes radioactifs de longue demi-vie

Isotope père → Isotope fils

^{87}Rb → ^{87}Sr $t_{1/2} = 47,5 \text{ Ga}$

^{147}Sm → ^{143}Nd $t_{1/2} = 106 \text{ Ga}$

^{176}Lu → ^{177}Hf $t_{1/2} = 35,9 \text{ Ga}$

^{232}Th → ^{208}Pb $t_{1/2} = 14 \text{ Ga}$

^{235}U → ^{207}Pb $t_{1/2} = 0,707 \text{ Ga}$

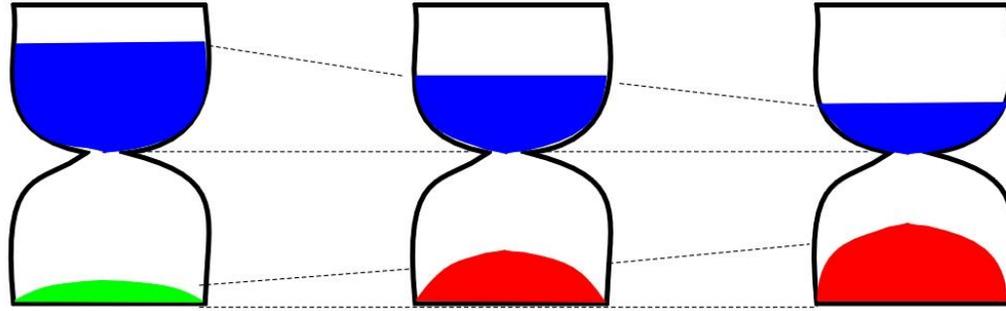
^{238}U → ^{206}Pb $t_{1/2} = 4,47 \text{ Ga}$

Décroissance très lente

→ Variation très faible des rapports isotopiques

→ Nécessité de mesurer les rapports avec une grande précision analytique (ppm)

DÉCROISSANCE RADIOACTIVE - PRINCIPES

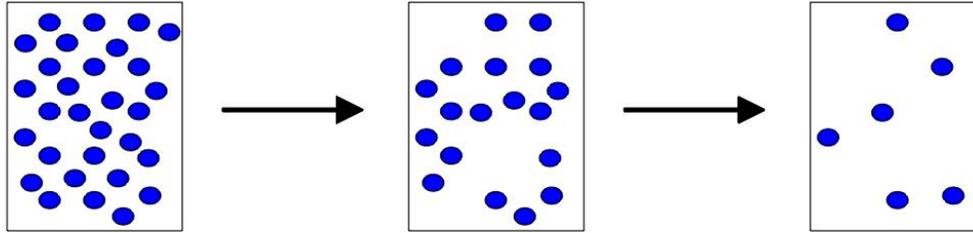


$T_{1/2}$: demi-vie

λ : constante de désintégration

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

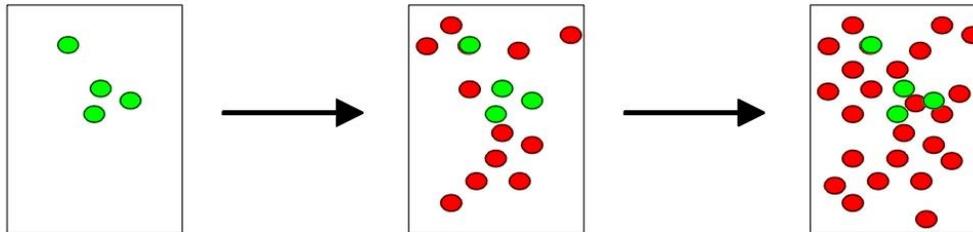
Isotope père



P: Isotope père

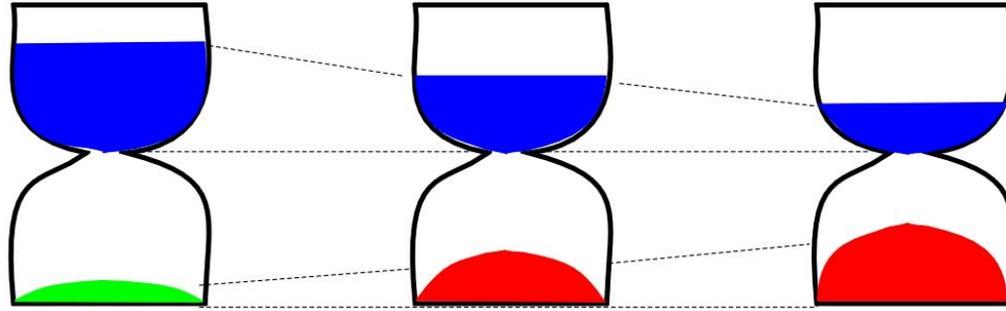
D: Isotope fils

Isotope fils



$$D = D_0 + P.(e^{\lambda t} - 1)$$

DÉCROISSANCE RADIOACTIVE - PRINCIPES

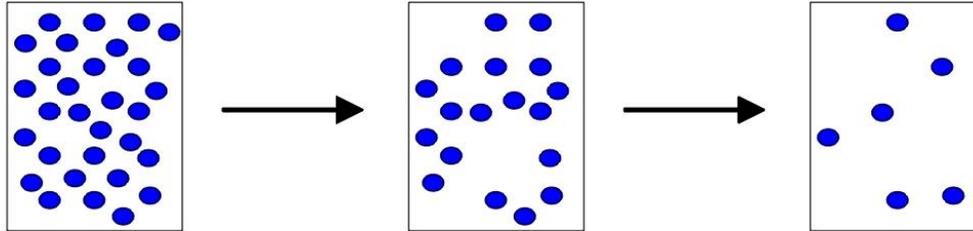


$T_{1/2}$: demi-vie

λ : constante de désintégration

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

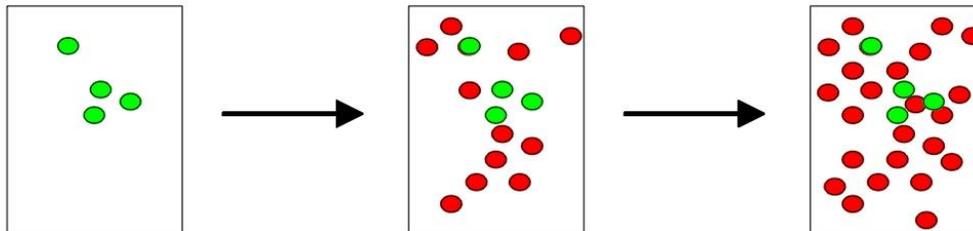
Isotope père



P: Isotope père

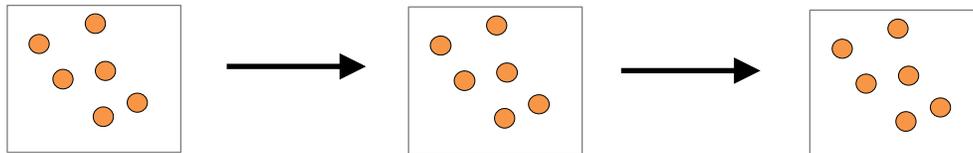
D: Isotope fils

Isotope fils



$$D = D_0 + P \cdot (e^{\lambda t} - 1)$$

Isotope stable



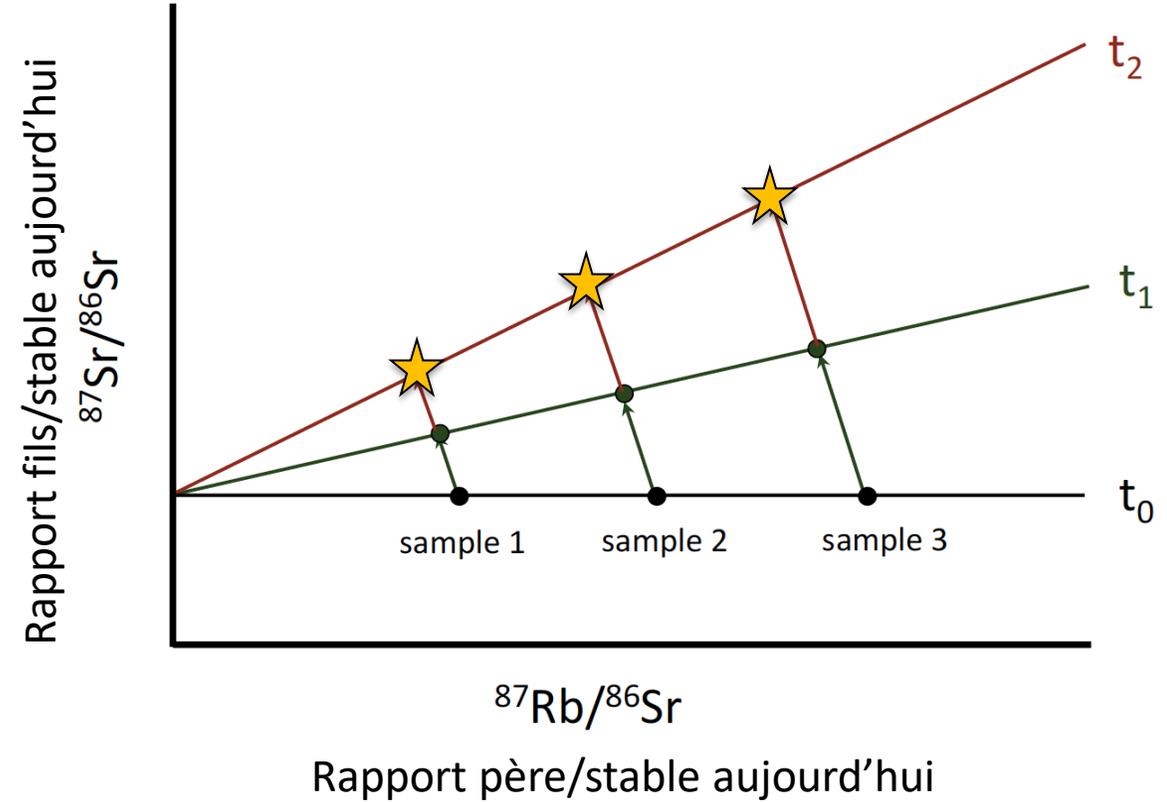
$$\frac{D}{S} = \frac{D_0}{S} + \frac{P \cdot (e^{\lambda t} - 1)}{S}$$

DATATION DES ROCHES PAR MÉTHODE ISOCHRONE

Exemple avec le système radiogénique $^{87}\text{Rb}-^{86}\text{Sr}$

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}}{\text{Rapport fils/stable aujourd'hui}} = \underbrace{({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_0}_{\text{Rapport fils/stable initial}} + \underbrace{({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})}_{\text{Rapport père/stable aujourd'hui}} (e^{\lambda t} - 1)$$

Age de la roche

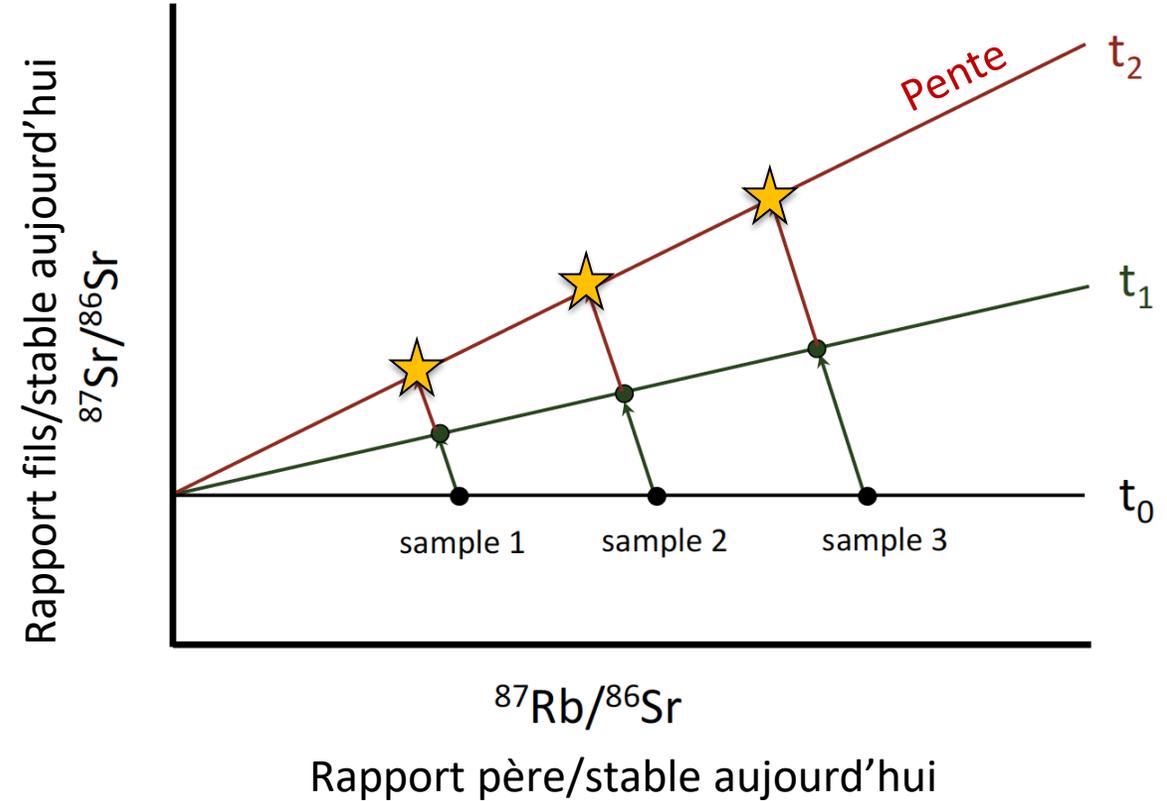


DATATION DES ROCHES PAR MÉTHODE ISOCHRONE

Exemple avec le système radiogénique ^{87}Rb - ^{86}Sr

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}}{y \text{ Analyse}} = \underbrace{({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_0}_{\text{Intercepte}} + \underbrace{({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})}_{x \text{ Analyse}} \underbrace{(e^{\lambda t} - 1)}_{\text{Pente}}$$

Analyses isotopiques d'une série de roches que l'on suppose cogénétiques (= même source et même âge)



LA ROCHE LA PLUS VIEILLE SUR TERRE – ÂGE DÉBATTU

NUVVUAGITTUQ au Canada
4,3 Ga ou 3,9 Ga ?

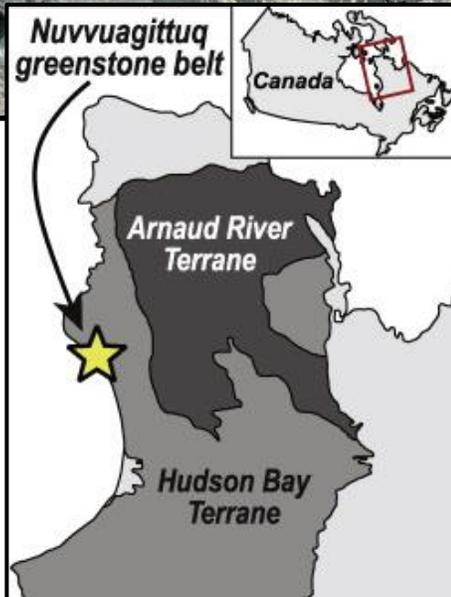
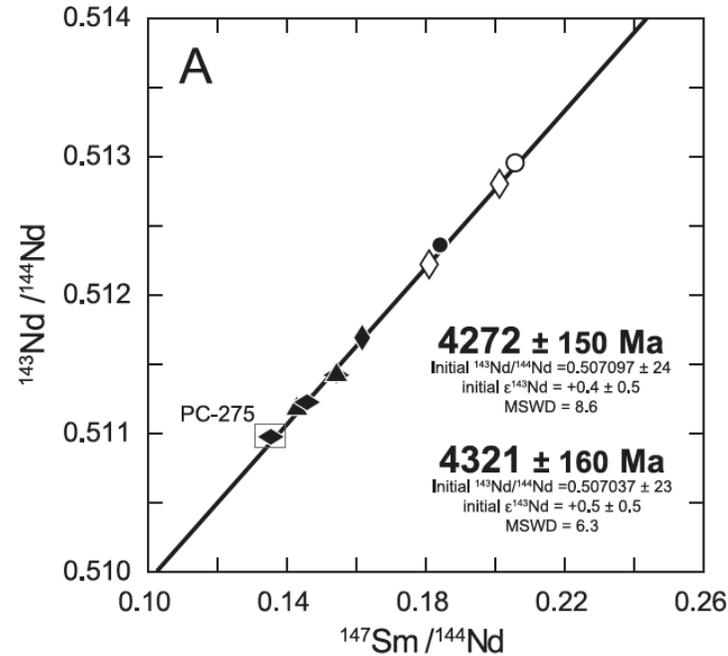
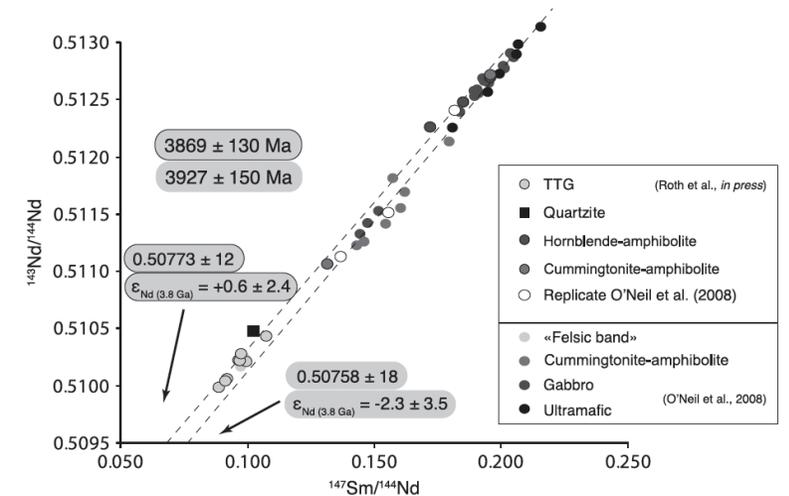


Diagramme isochrone ^{147}Sm - ^{144}Nd



O'Neil et al., 2008; 2012

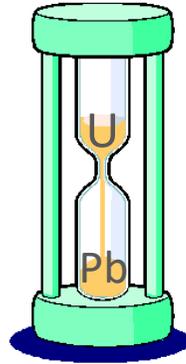
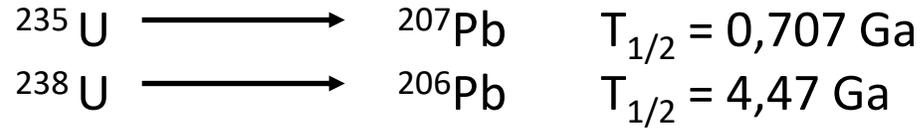


Guitreau et al., 2012

L'âge isochrone repose sur des hypothèses *a priori* et peut être perturbé si le système est ré-ouvert après la cristallisation de la roche.

DATATION DES MINÉRAUX – EXEMPLE DU ZIRCON

Datation des zircons par la méthode avec la désintégration de l'Uranium (U) en plomb (Pb)



Les zircons incorporent beaucoup d'U mais pas de Pb lors de leur cristallisation

→ Tout le Pb est radiogénique

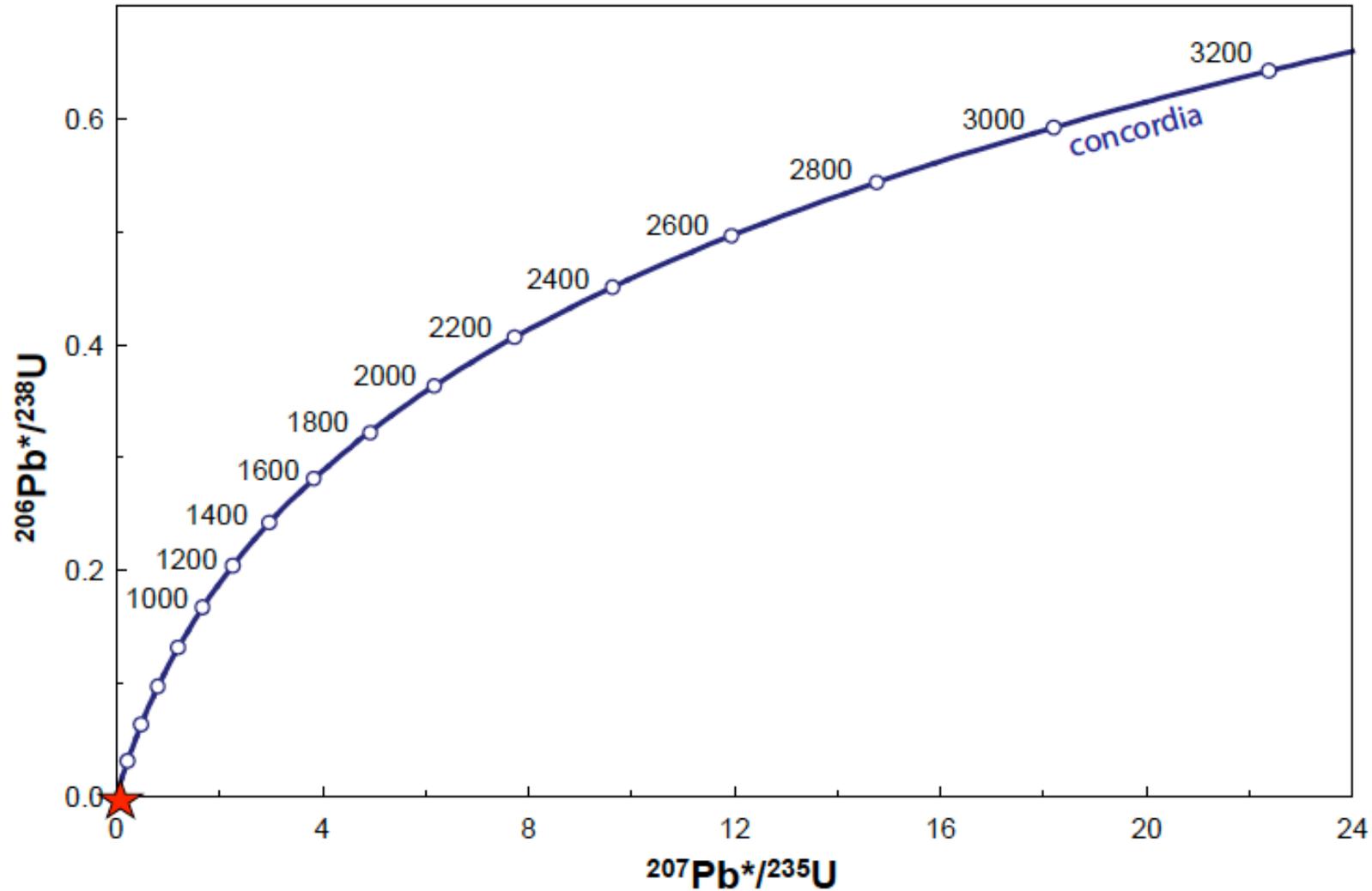
$${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} = \cancel{({}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_0} + ({}^{235}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}) (e^{\lambda_1 t} - 1) \longrightarrow {}^{207}\text{Pb}/{}^{235}\text{U} = e^{\lambda_1 t} - 1$$

$${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb} = \cancel{({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_0} + ({}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}) (e^{\lambda_2 t} - 1) \longrightarrow {}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U} = e^{\lambda_2 t} - 1$$

Pas de Pb initial

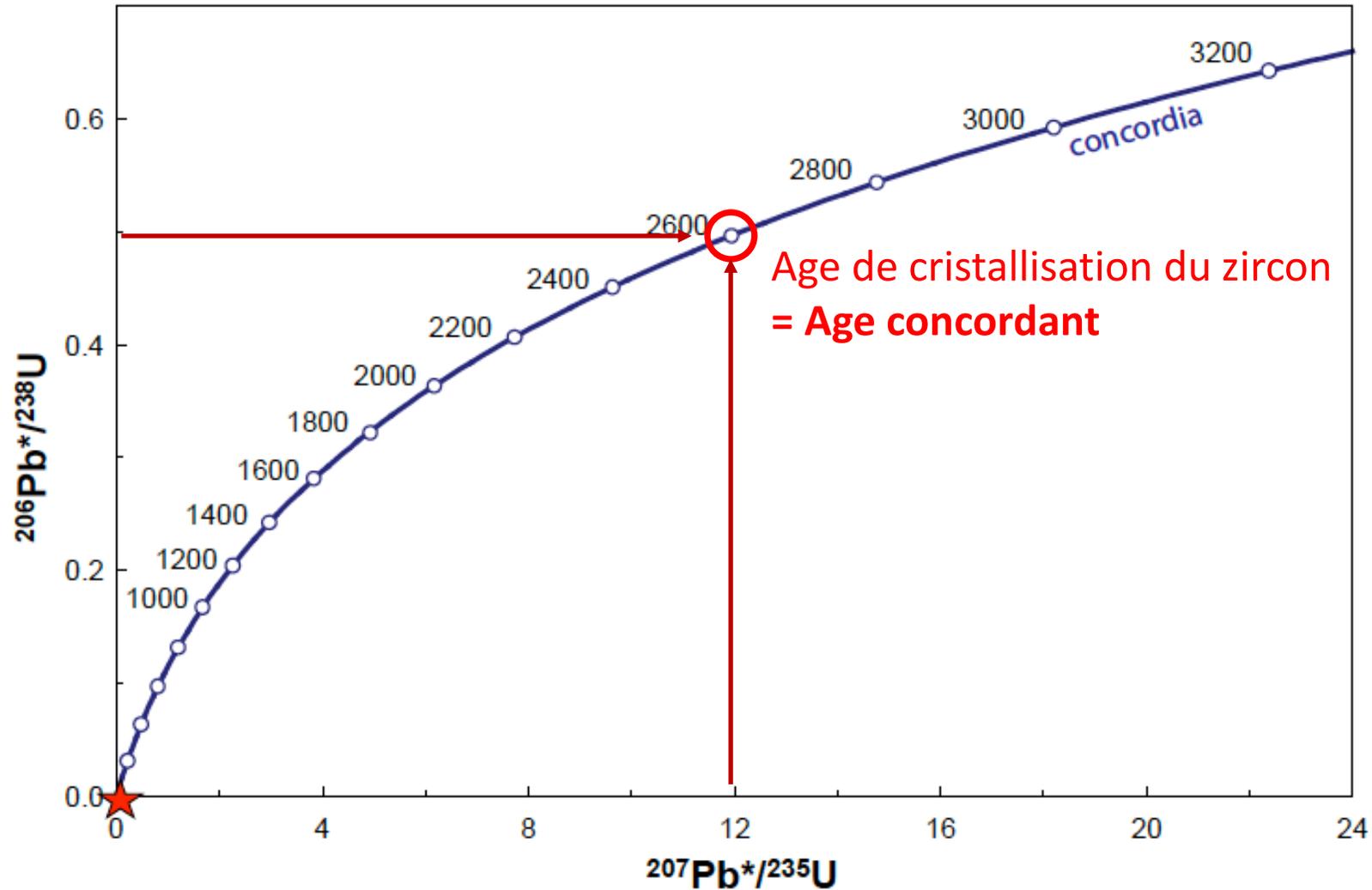
DATATION DES MINÉRAUX – EXEMPLE DU ZIRCON

Diagramme Concordia



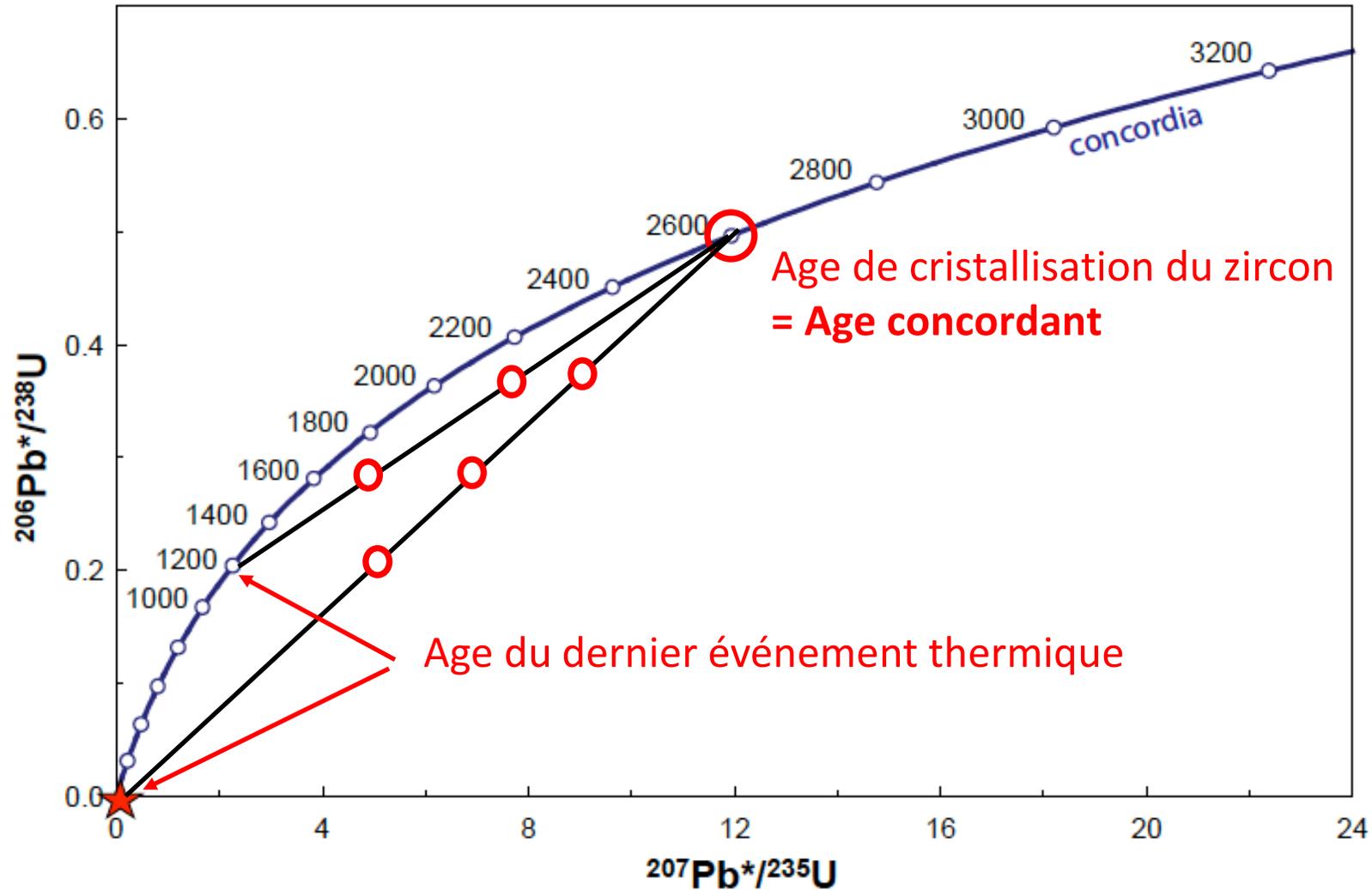
DATATION DES MINÉRAUX – EXEMPLE DU ZIRCON

Diagramme Concordia



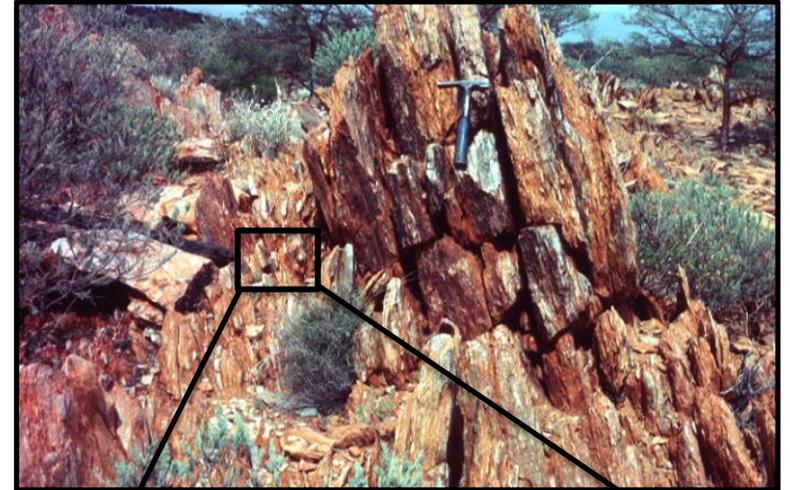
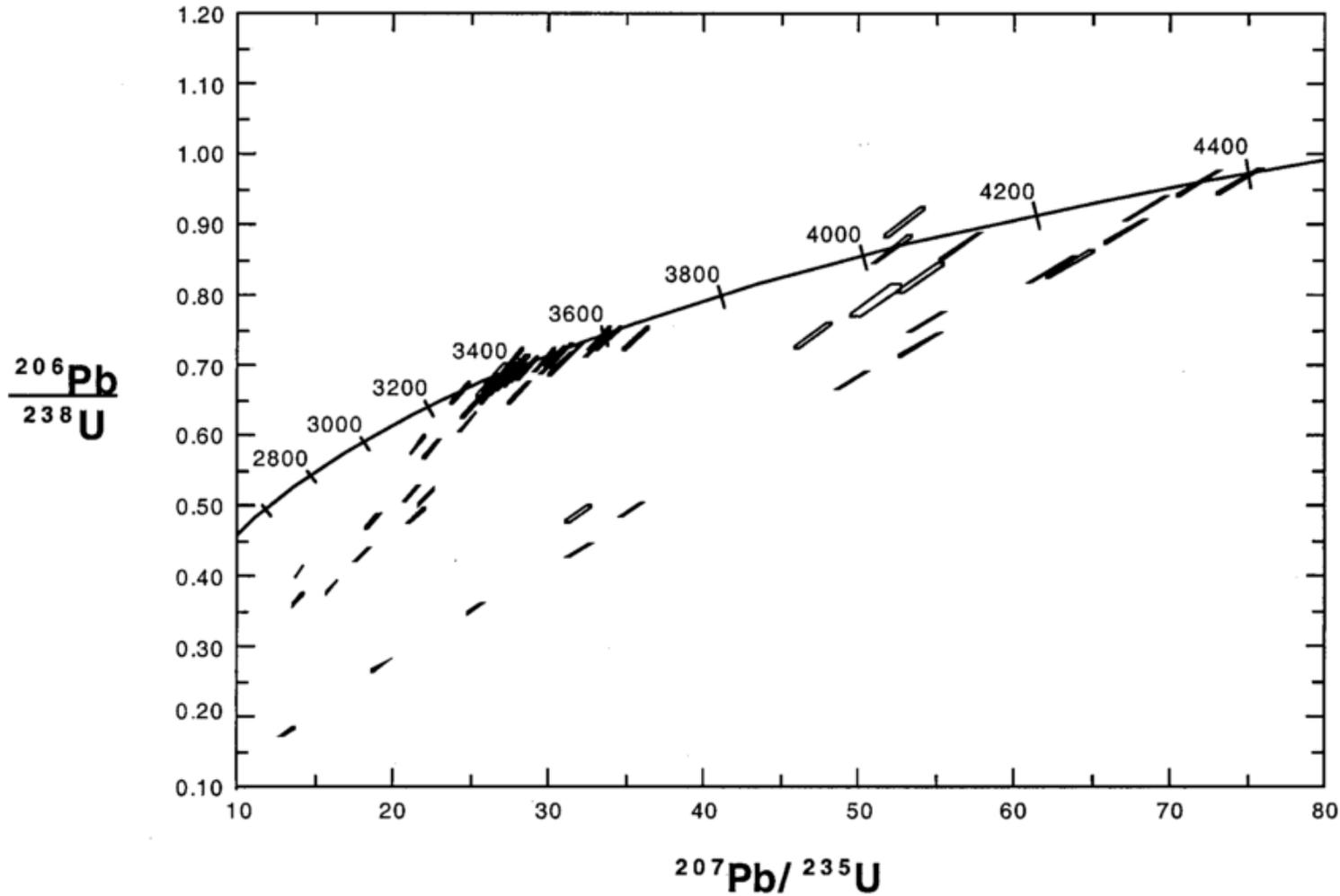
DATATION DES MINÉRAUX – EXEMPLE DU ZIRCON

Diagramme Concordia



DATATION DES ZIRCONS DE JACK HILLS, AUSTRALIE

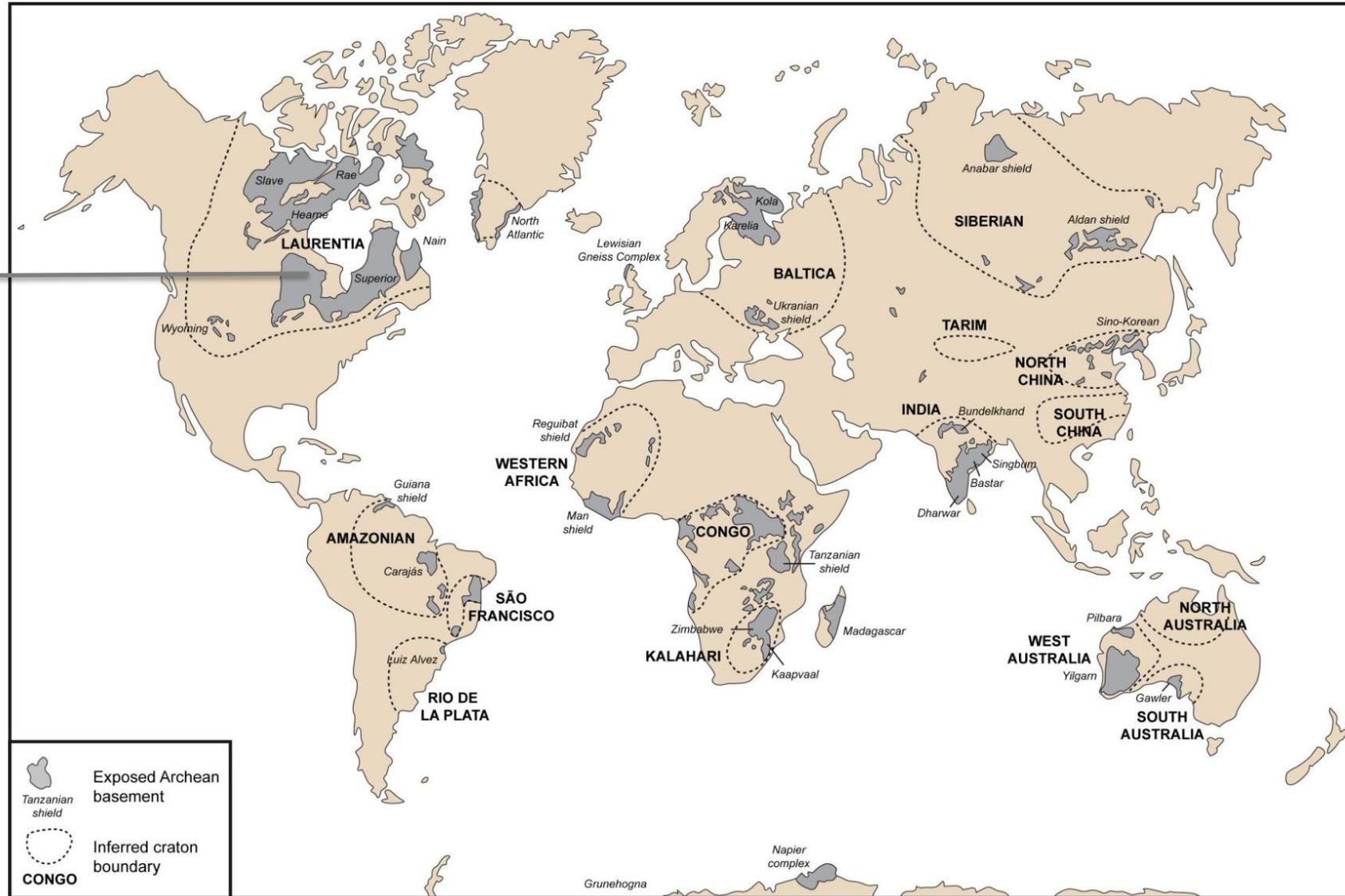
Beaucoup de zircons de plus de 4 Ga



LOCALISATION DES PLUS VIEILLES ROCHES SUR TERRE

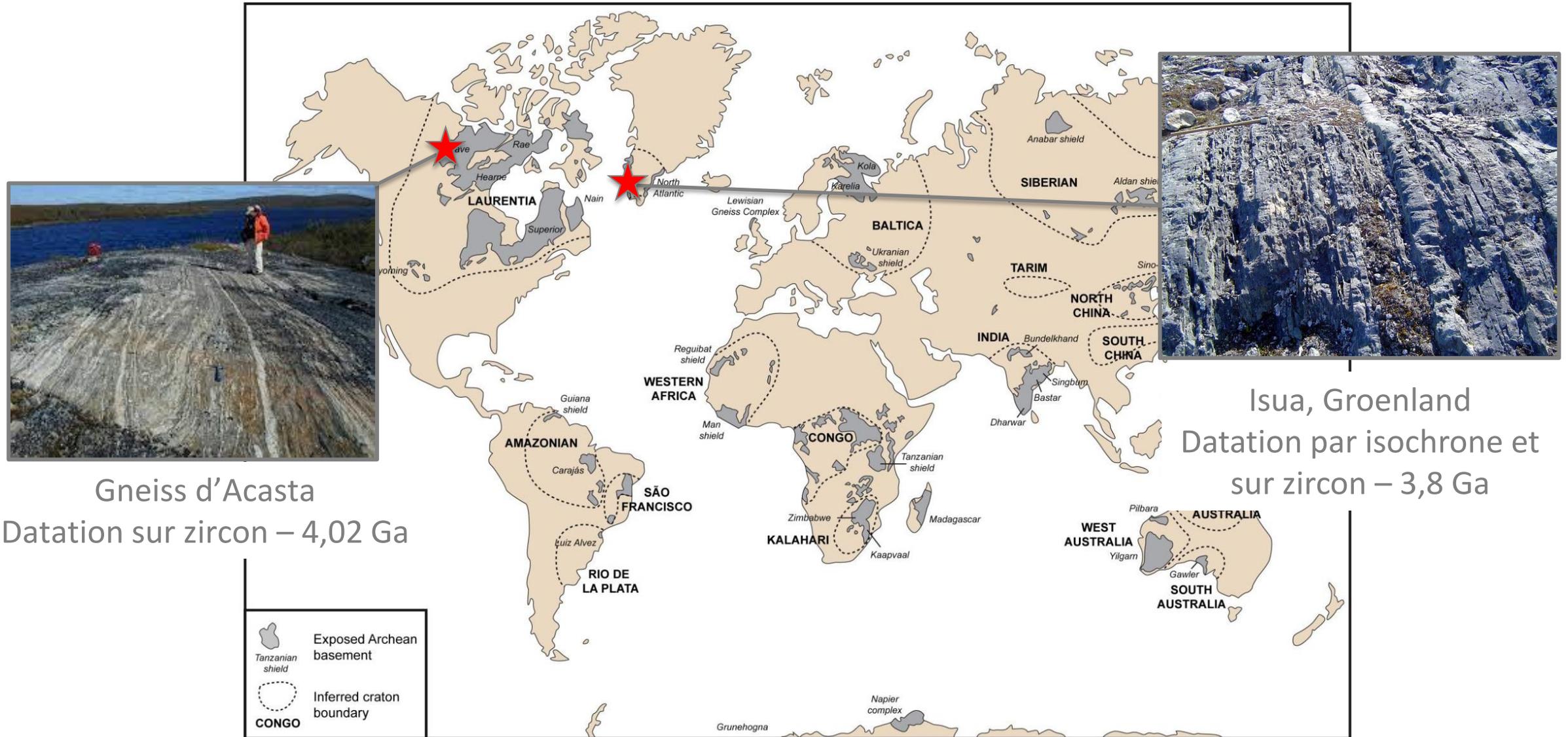
Carte de la répartition des cratons

Craton
exposant des
roches de plus
de 2,5 Ga à
l'affleurement

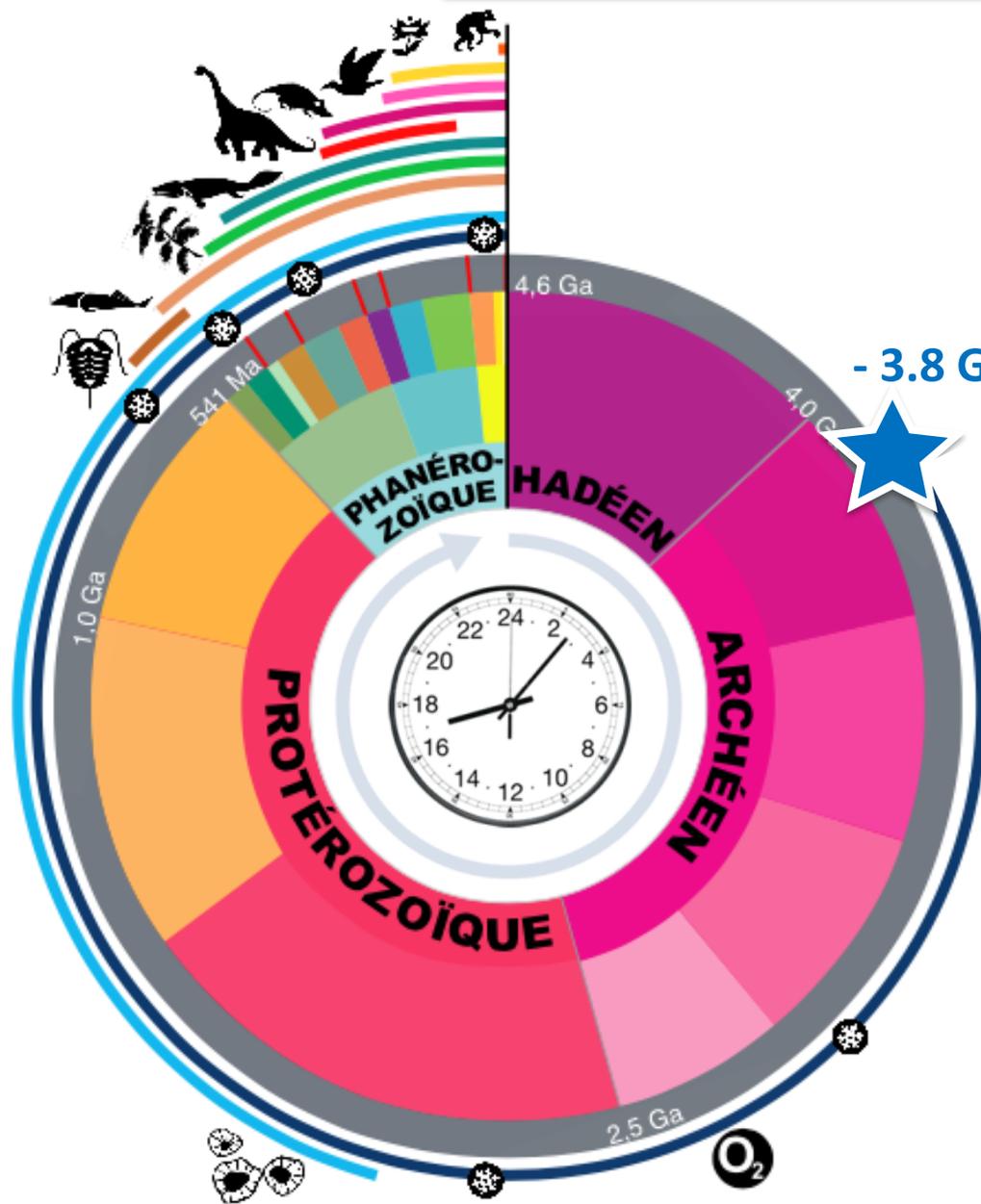


LOCALISATION DES PLUS VIEILLES ROCHES SUR TERRE

Carte de la répartition des cratons



APPARITION DES OCÉANS SUR TERRE



- 3.8 Ga



4h00 :
Plus vieux sédiment =
Evidence directe d'eau liquide



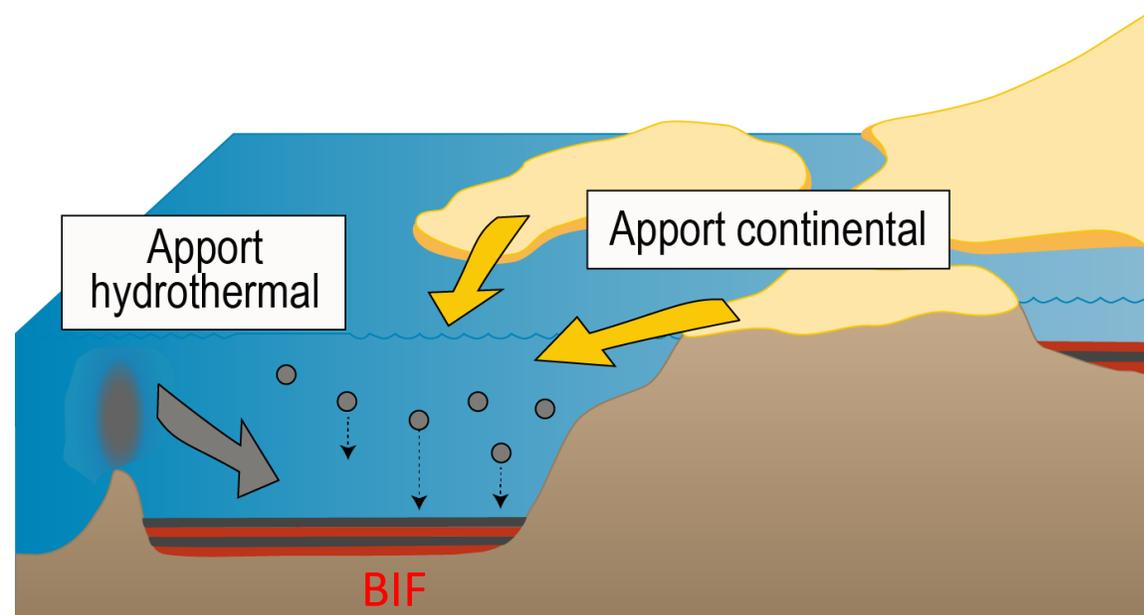
PLUS VIEILLE ROCHE SÉDIMENTAIRE

Formation de fer rubanées (BIF) d'Isua (Groënland) âgées de 3,8 Ga

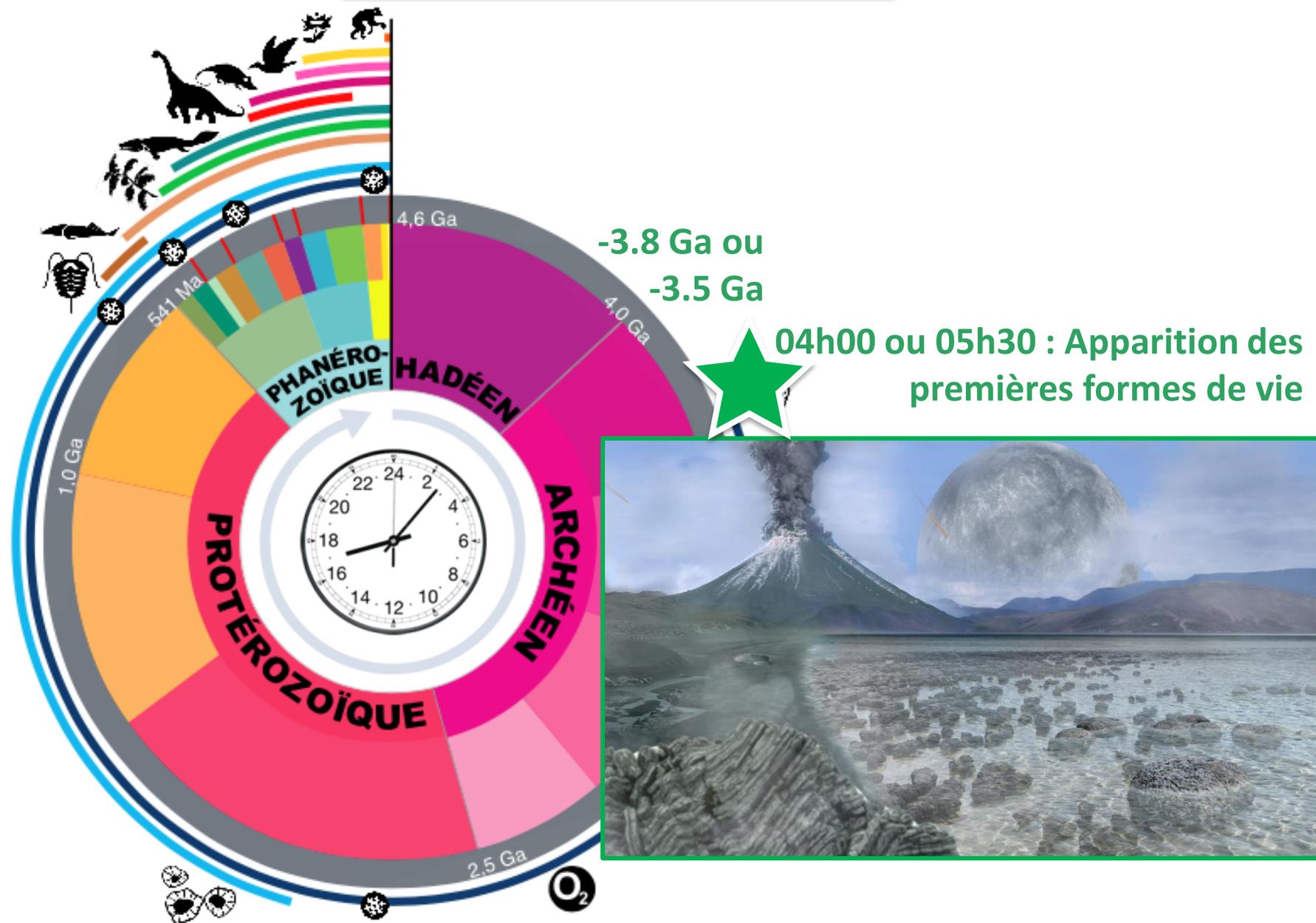


Bande blanche ou rouge
= riche en silice

Bande noire = riche en fer



APPARITION DE LA VIE PRIMITIVE



APPARITION DE LA VIE PRIMITIVE

Stromatolithe Archéen



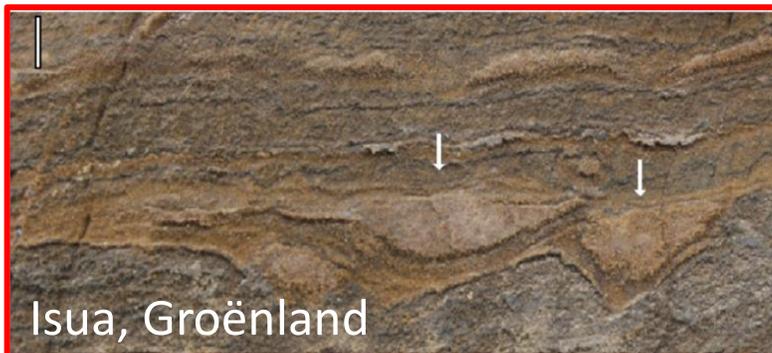
Strelley pool Formation, Pilbara, Australia
3.35-3.43 Ga

Stromatolithe moderne



Tapis microbiens
(cyanobactéries) sur les côtes
Australiennes

Stromatolithe de 3.8 Ga?



Isua, Groënland

**Beaucoup d'études
contradictoires !**

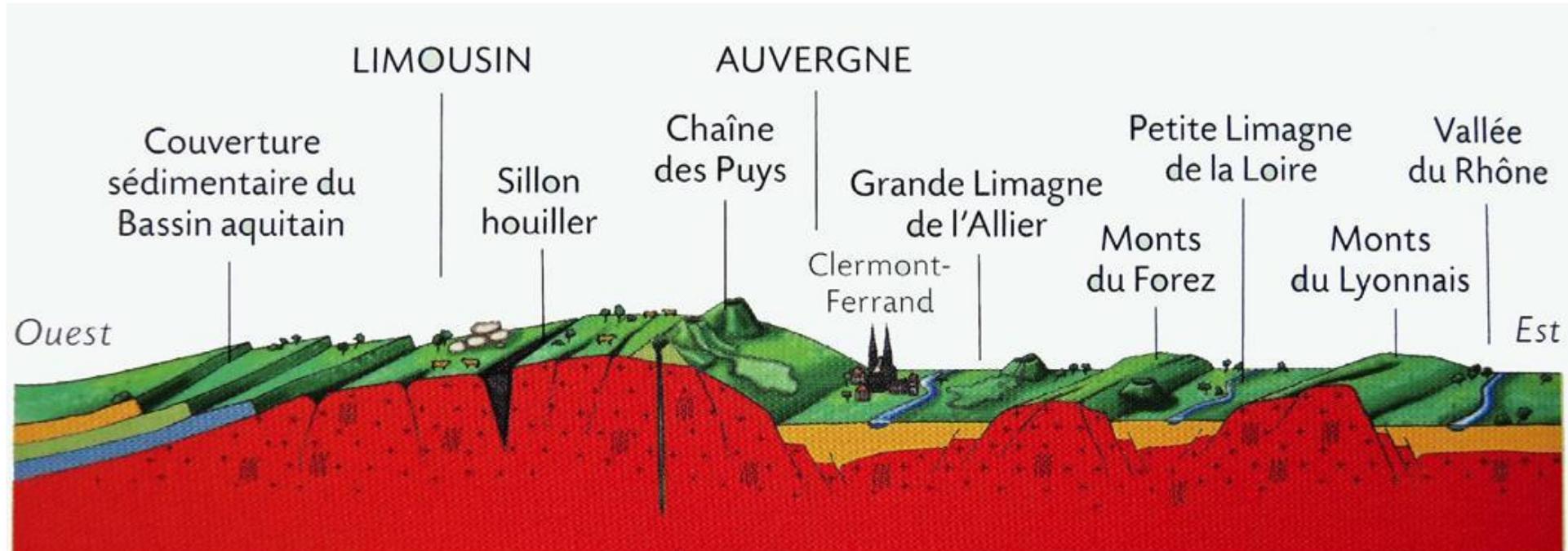
Pas encore de marqueurs géochimiques
fiables pour détecter les premières formes
de vie

DES STROMATOLITHES À CLERMONT-FERRAND !

Stromatolithes de Chadrat (63)



Stromatolithes de Jussat (63)



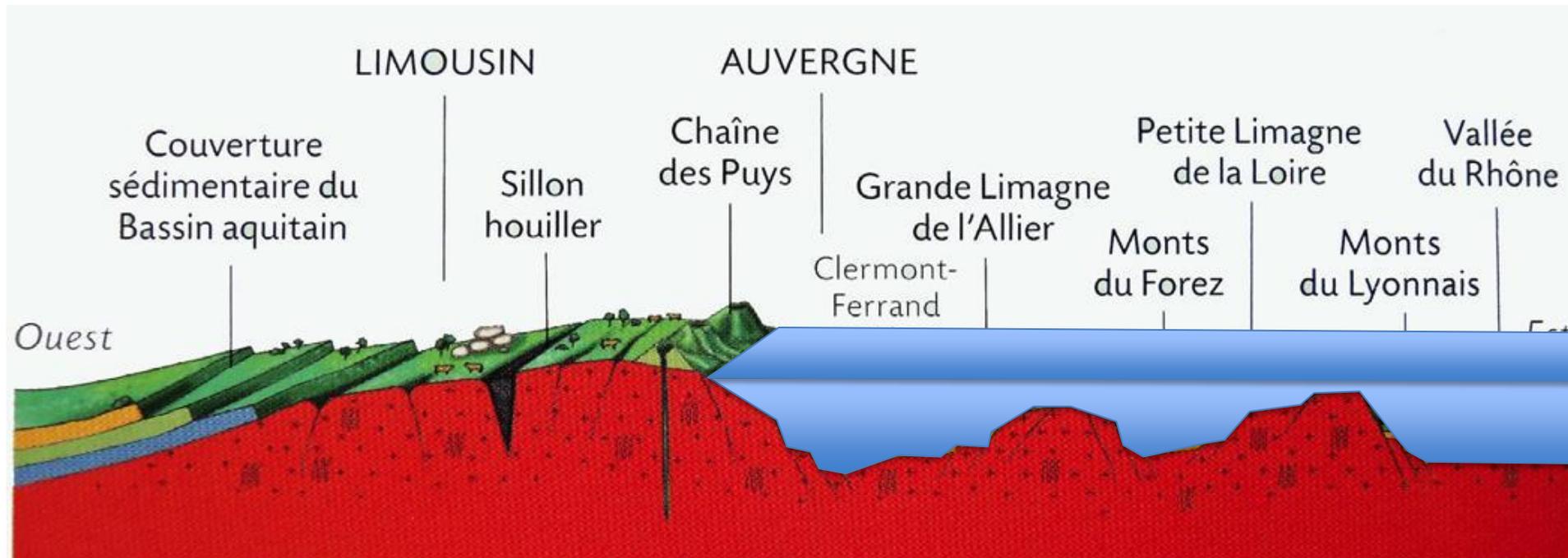
DES STROMATOLITHES À CLERMONT-FERRAND !

Stromatolithes de Chadrat (63)

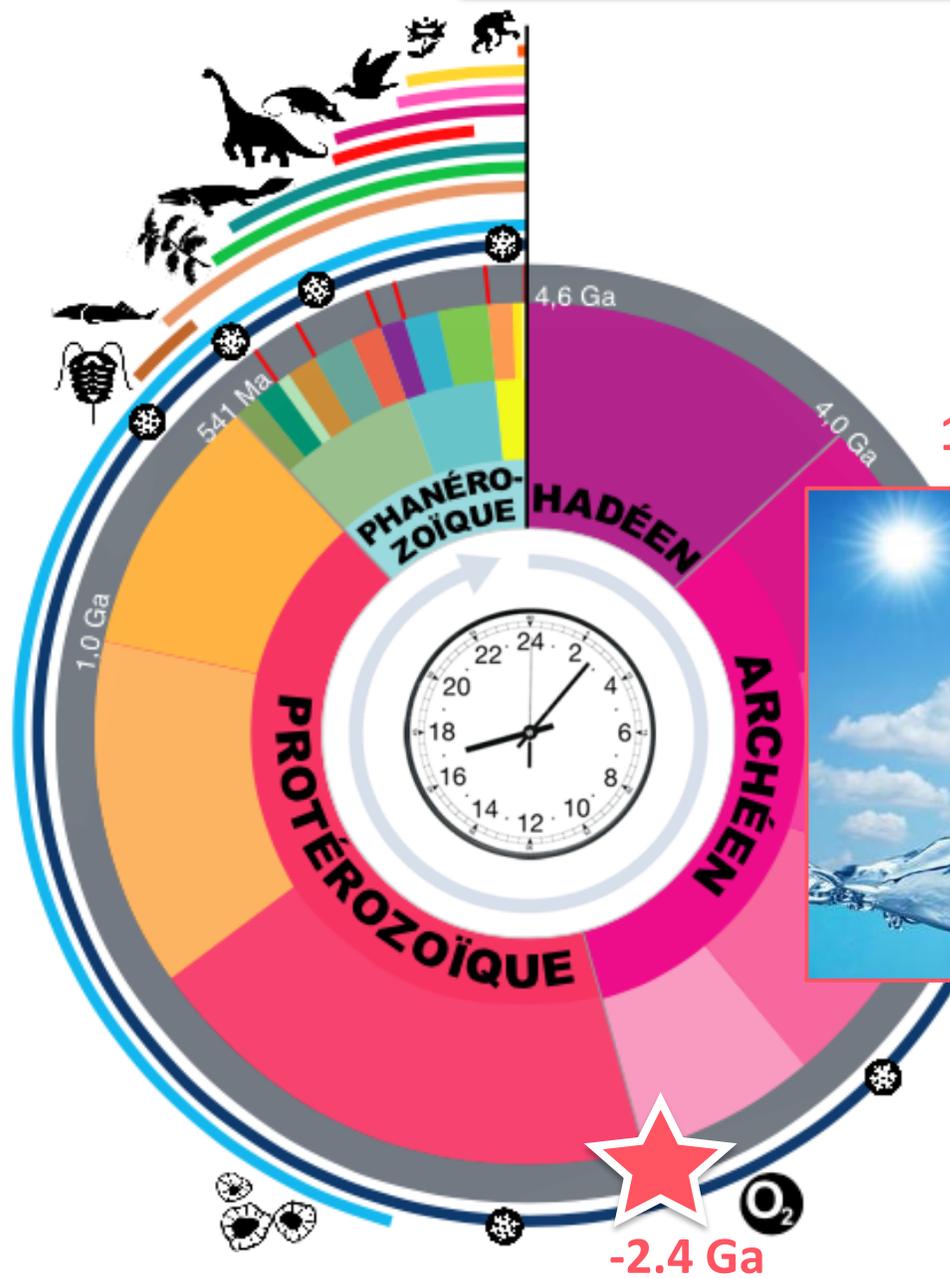


Vestiges d'un **grand lac** (ou petite mer) au niveau de la **Limagne** il y a **30 Ma**

Stromatolithes de Jussat (63)



ACCUMULATION D' OXYGÈNE DANS L' ATMOSPHÈRE

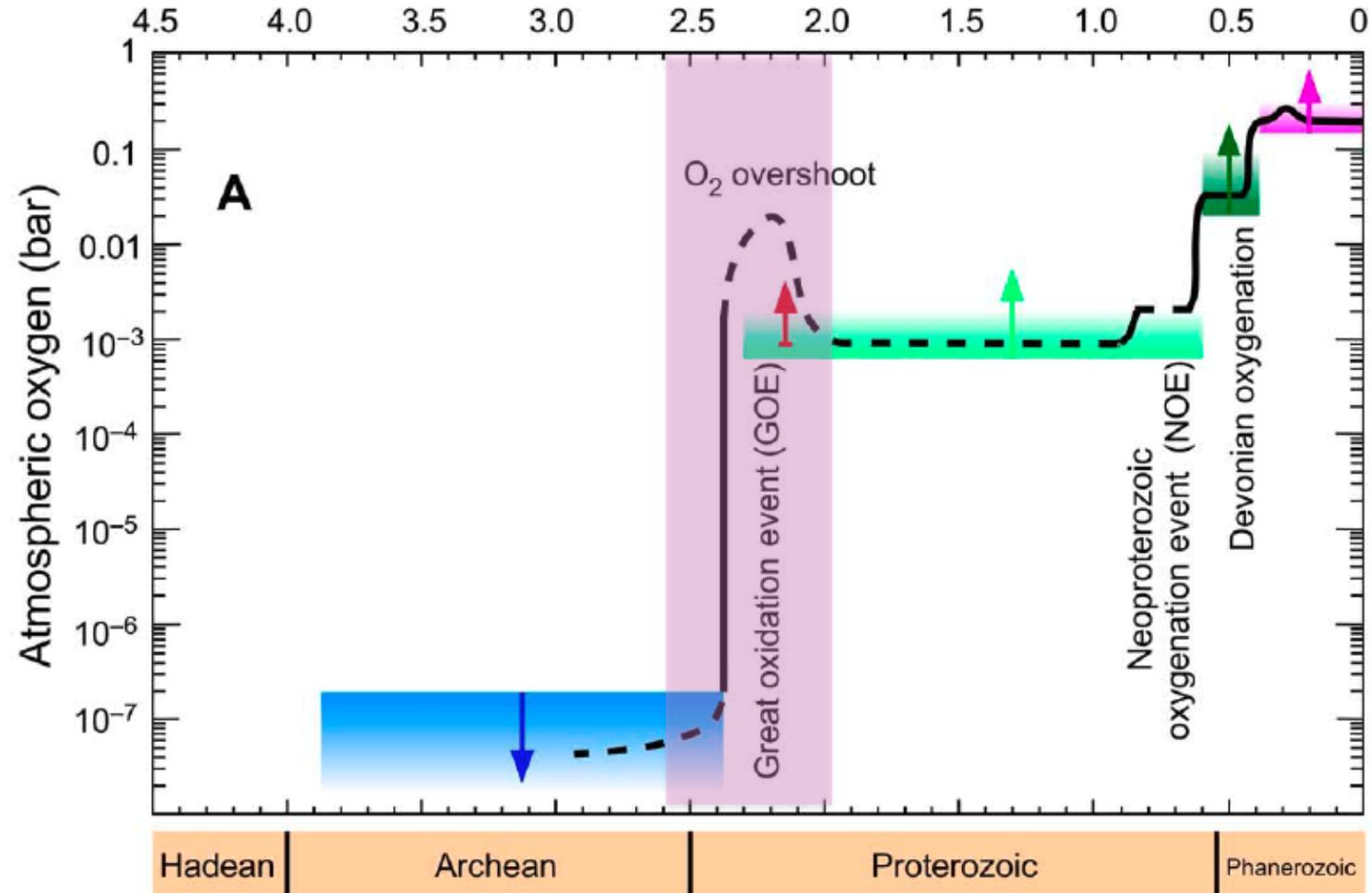


10h50 : Oxygénation de l'atmosphère



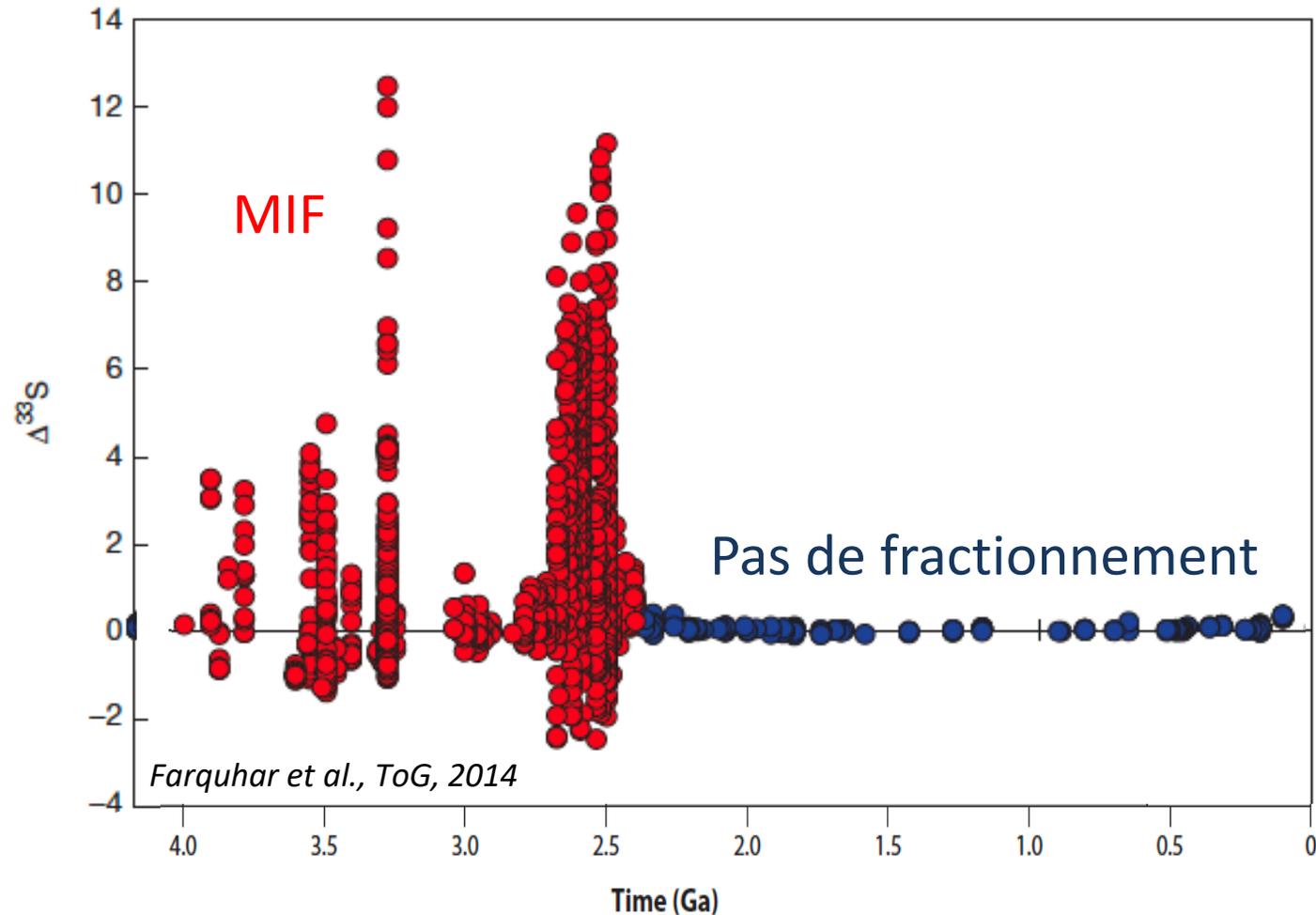
ACCUMULATION D'OXYGÈNE DANS L'ATMOSPHÈRE

Grand évènement d'oxygénation (GOE)



QUANTITÉ NÉGLIGEABLE D' O₂ AVANT 2,4 Ga

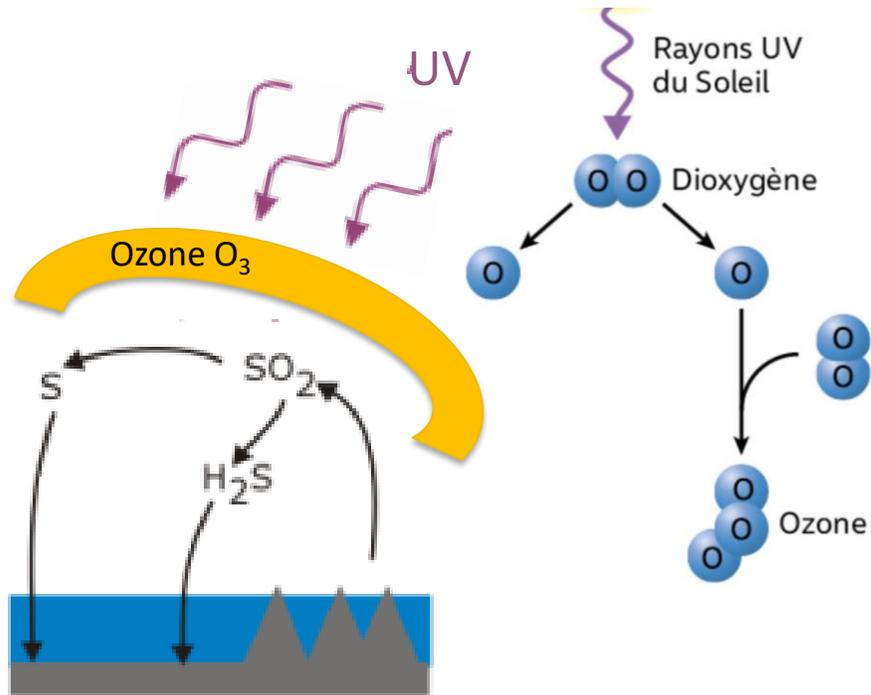
Fractionnement indépendant de la masse (MIF) des isotopes du soufre dans les sédiments Archéens (> 2,5 Ga)



QUANTITÉ NÉGLIGEABLE D'O₂ AVANT 2,4 Ga

Fractionnement indépendant de la masse (MIF) des isotopes du soufre dans les sédiments Archéens

Atmosphère oxygénée

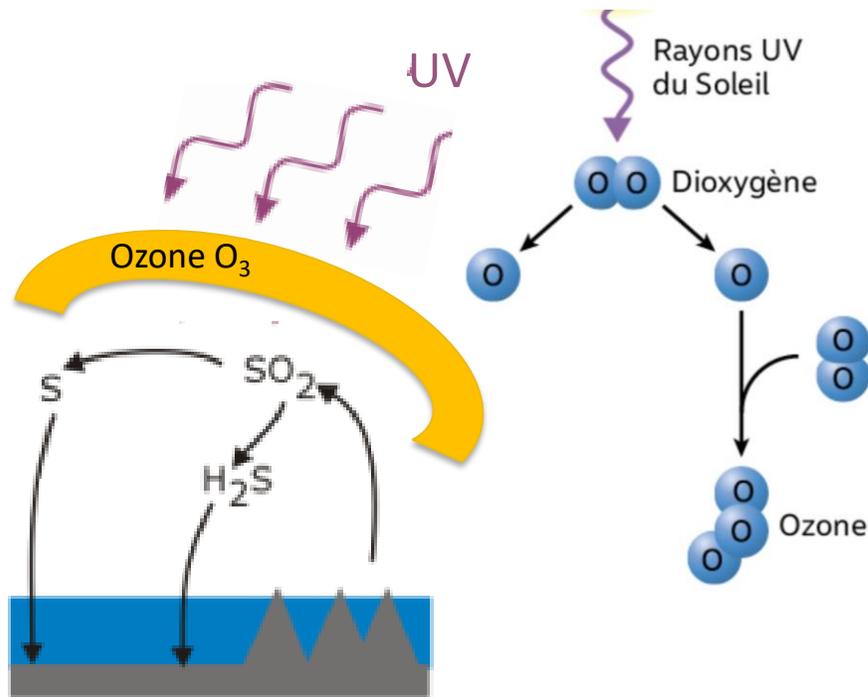


Le soufre est « protégé »
par la couche d'ozone

QUANTITÉ NÉGLIGEABLE D'O₂ AVANT 2,4 Ga

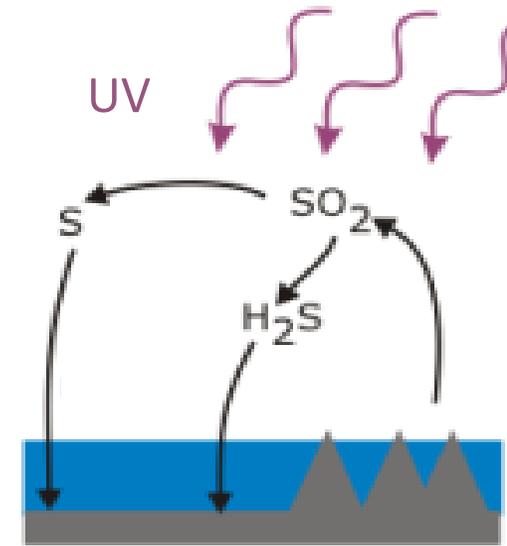
Fractionnement indépendant de la masse (MIF) des isotopes du soufre dans les sédiments Archéens

Atmosphère oxygénée



Le soufre est « protégé »
par la couche d'ozone

Atmosphère non oxygénée



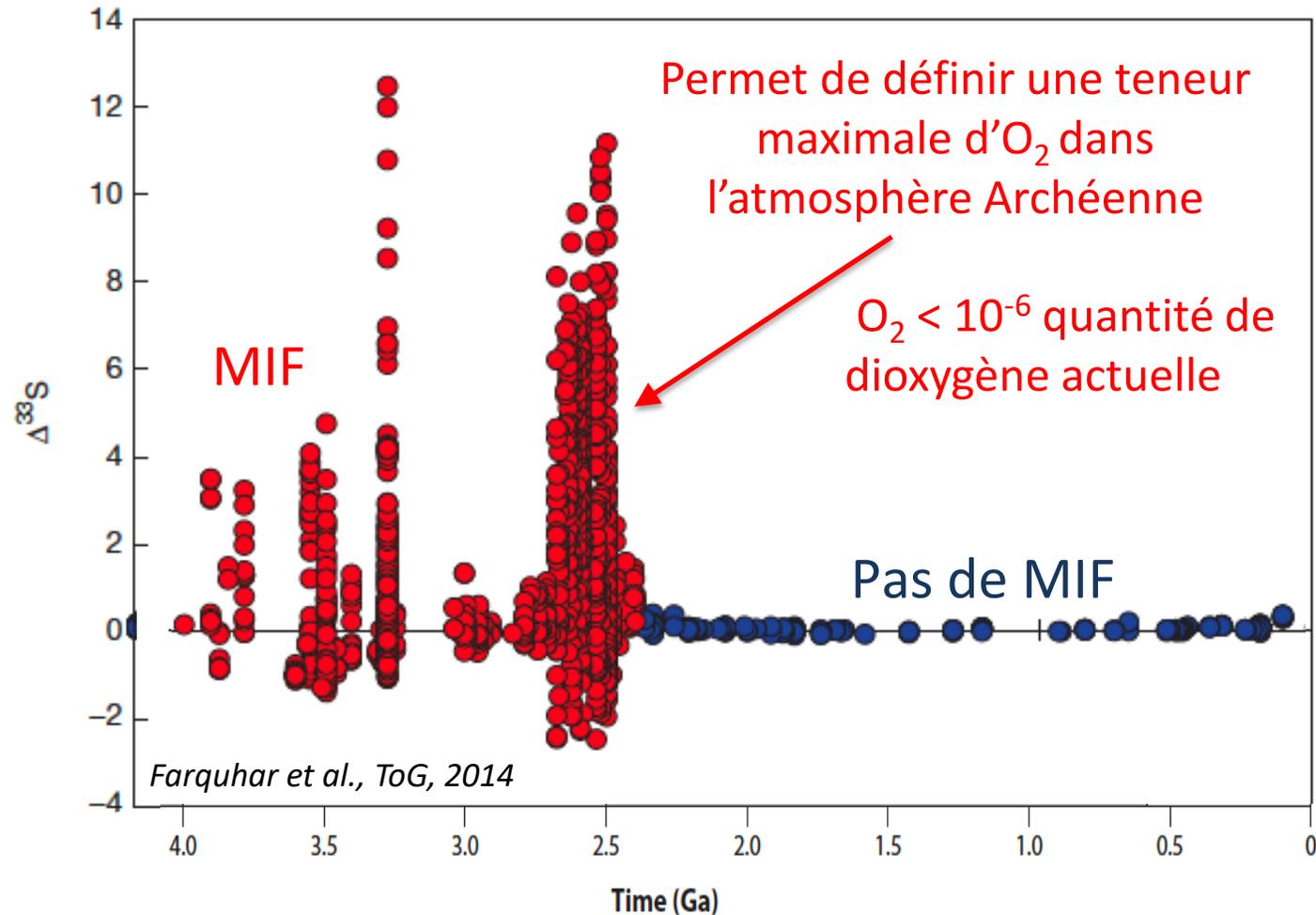
Photochimie

→ Le soufre est
fractionné

→ Formation des MIF

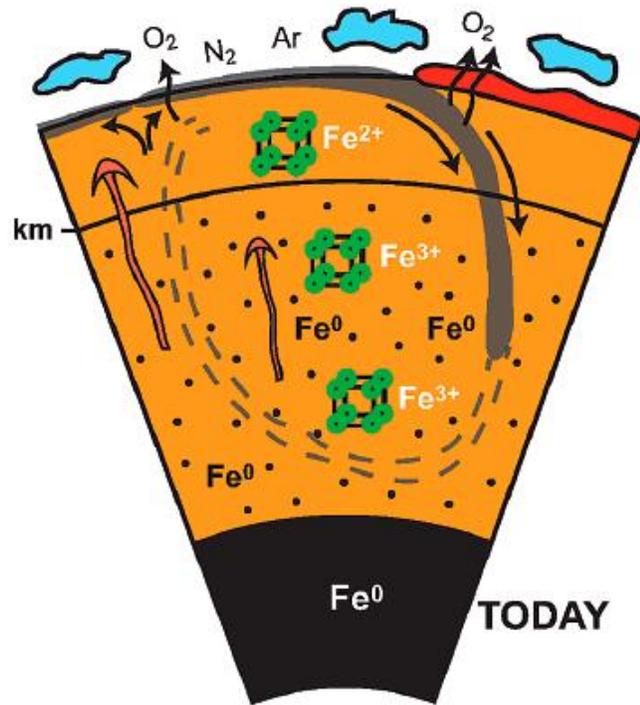
QUANTITÉ NÉGLIGEABLE D'O₂ AVANT 2.4 Ga

Fractionnement indépendant de la masse (MIF) des isotopes du soufre dans les sédiments Archéens



CAUSES DU GRAND EVENEMENT D'OXYGENATION (GOE)

Deux grandes hypotheses :

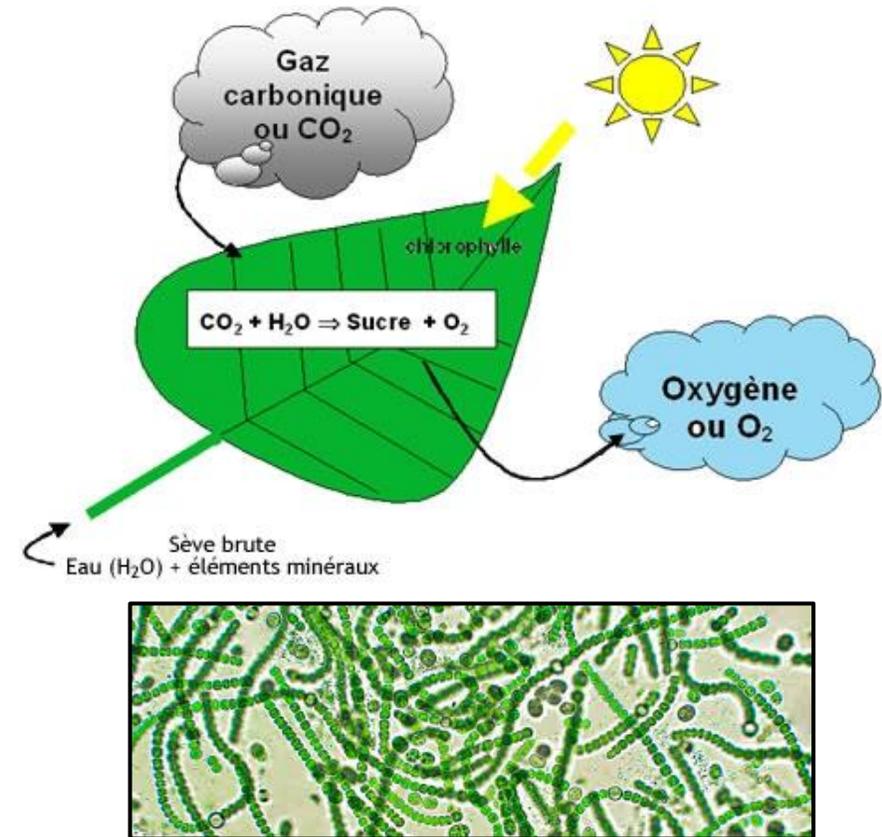


GÉOLOGIQUE

Changement de géodynamique du manteau terrestre

Andrault et al., 2018

OU

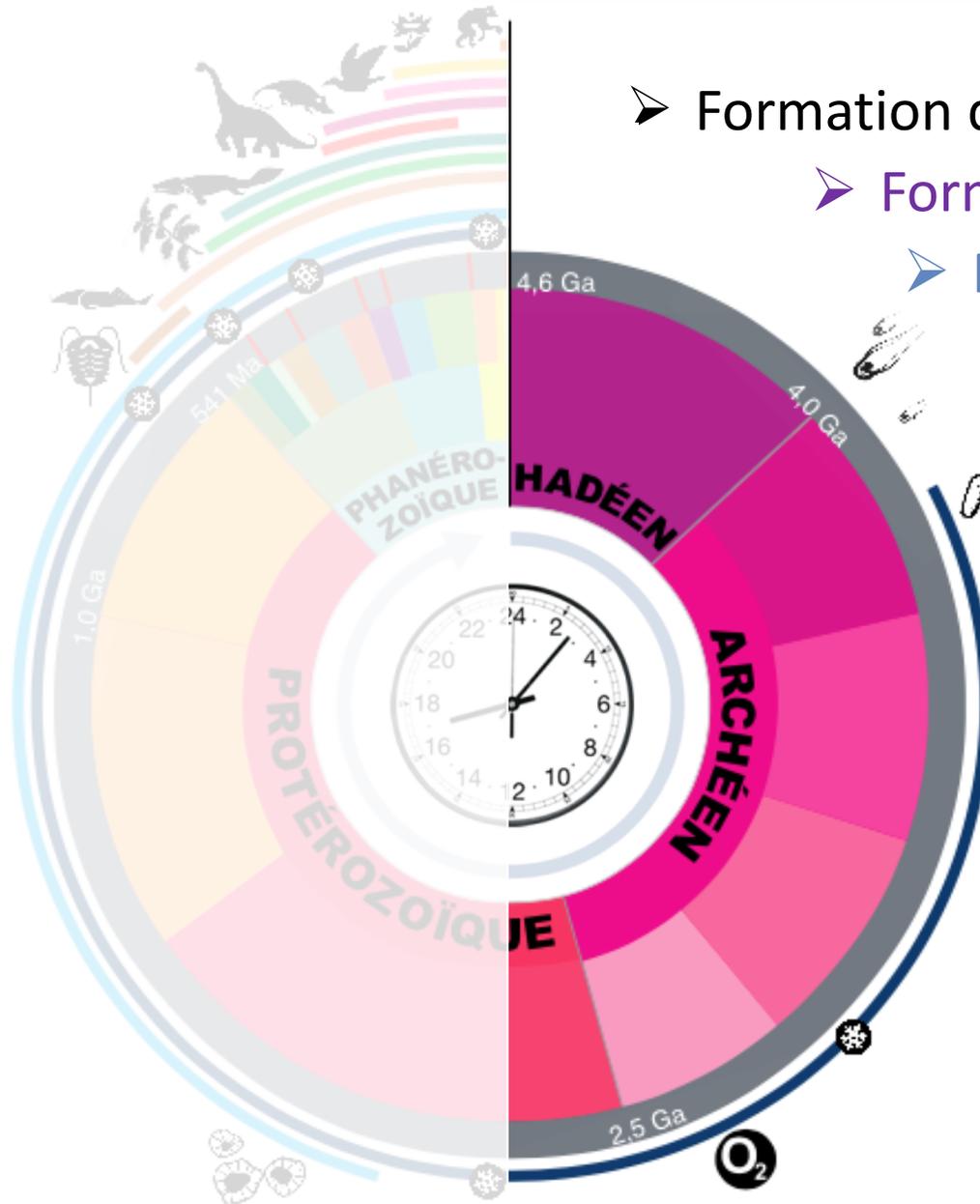


BIOLOGIQUE

Apparition de la photosynthèse oxygénique

Lyons et al., 2014

HISTOIRE DE NOTRE PLANÈTE TERRE



➤ Formation de la Terre

➤ Formation de la Lune

➤ Premiers océans

➤ Premiers continents

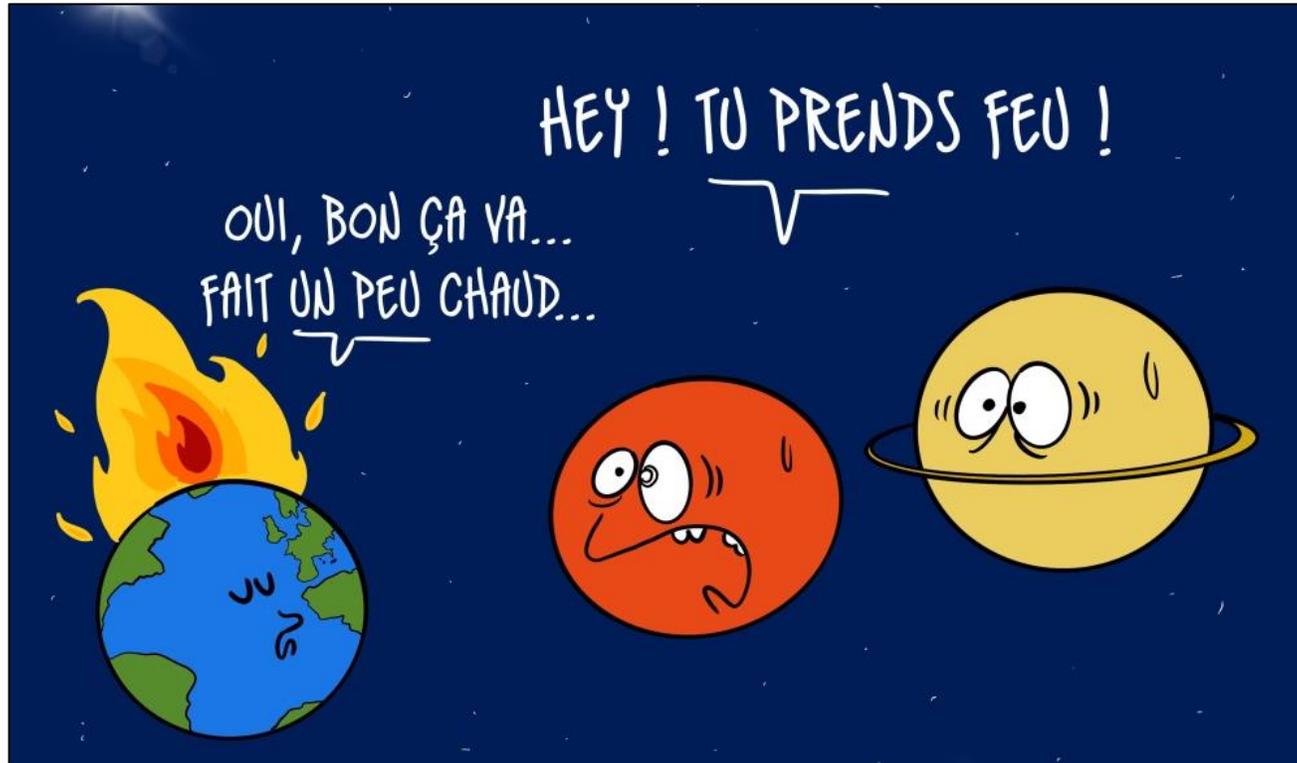
➤ Premières formes de vie

➤ Oxygénation de l'atmosphère

Beaucoup d'évènements catastrophiques !

FUTUR DE NOTRE PLANÈTE TERRE

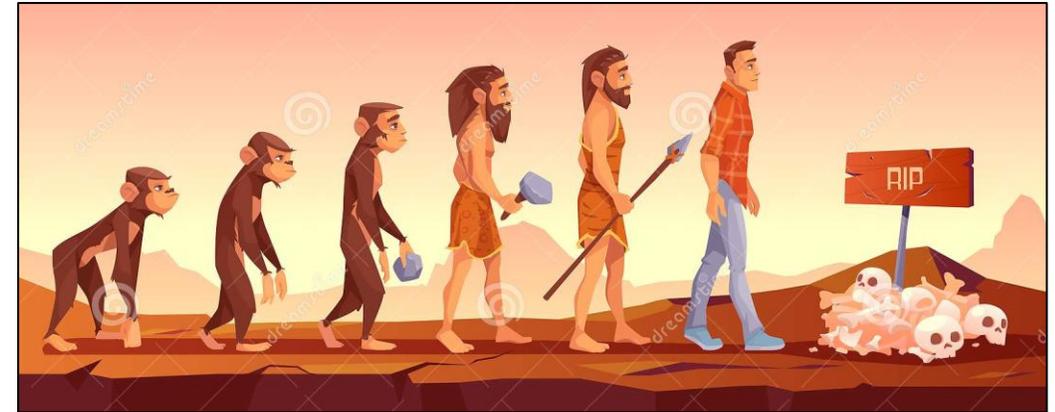
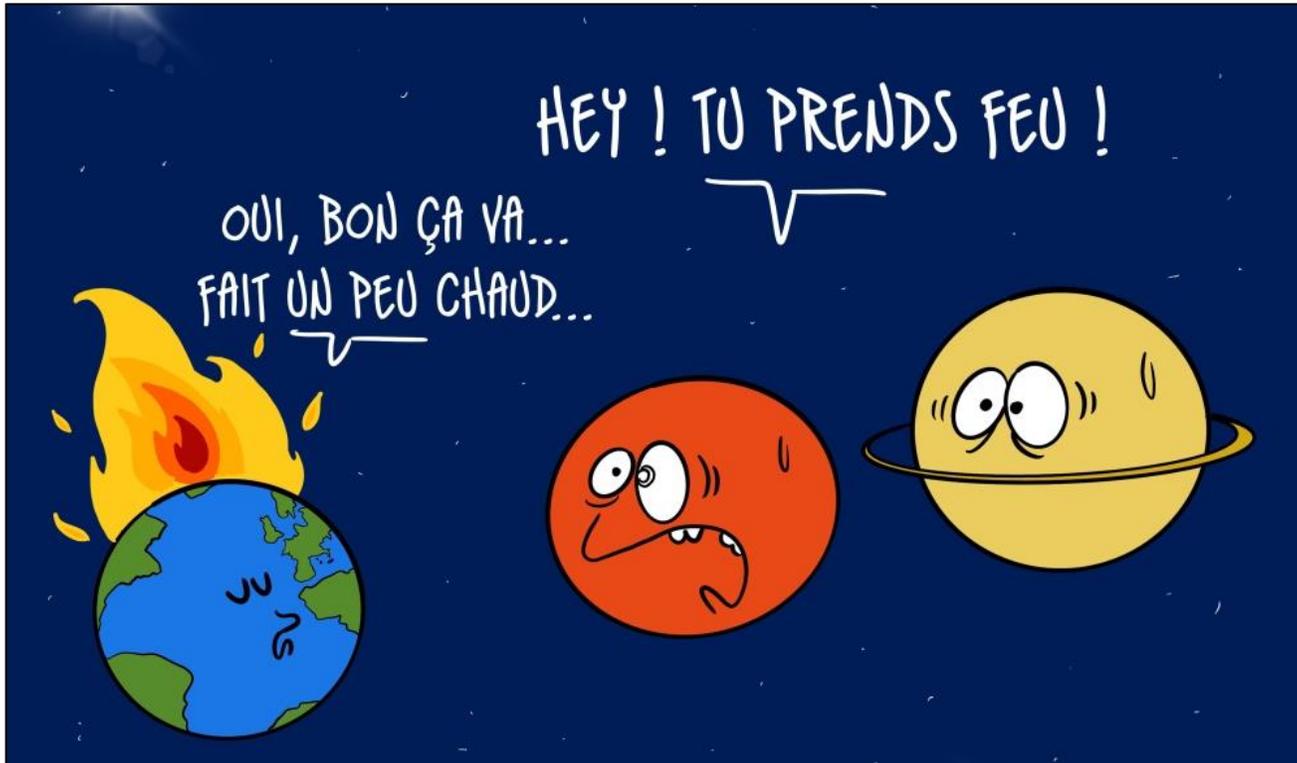
Réchauffement climatique à venir



Notre planète s'adapte très bien aux changements...

FUTUR DE NOTRE PLANÈTE TERRE

Réchauffement climatique à venir



Notre planète s'adapte très bien aux changements... Mais l'espèce humaine peut-être pas !

Merci !