

# 10A001 - ASTRONOMIE GÉNÉRALE

La Terre, une planète vivante dans le cosmos

11. La Terre demain

25 novembre 2025

<https://mediaserver.unige.ch/play/288529>

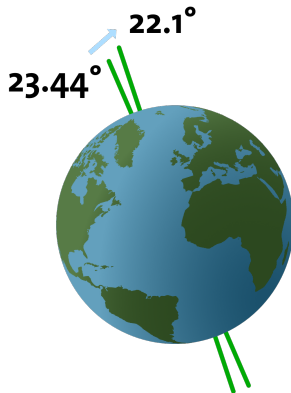
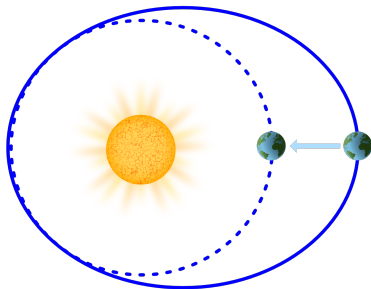


Sylvia Ekström  
Département d'Astronomie  
Université de Genève



# Evolution de la planète

Actuellement : rebond post-glaciaire, inclinaison et ellipticité en diminution



La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

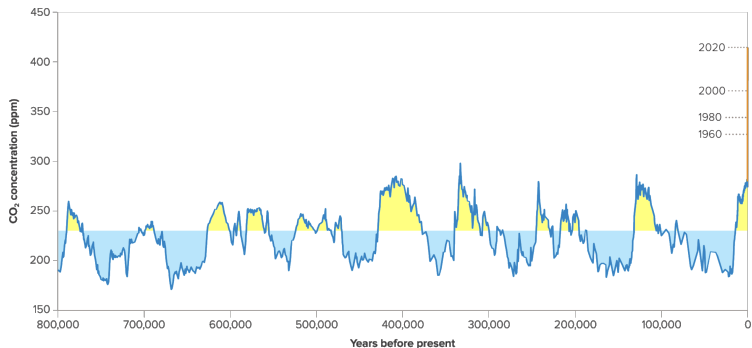
Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

# Evolution de la planète

Les activités humaines émettent beaucoup de CO<sub>2</sub>



*adapté de Le Quéré+ 2021*

Quelle influence vont avoir nos émissions ?

La Terre, une planète vivante dans le cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

Evolution à long terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

Références

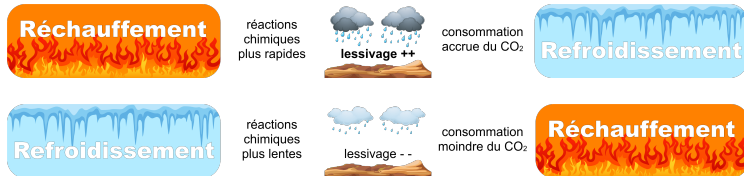


# Le cycle du carbone

Système auto-contrôlé par un double cycle :

- cycle biogénique (dizaines à milliers d'années)  
photosynthèse (absorption), respiration/décomposition (émission)
- cycle géologique (dizaines de milliers à millions d'années)  
lessivage (absorption), volcanisme (émission)

Normalement, réaction du cycle  $\text{CO}_2$  aux conditions climatiques



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

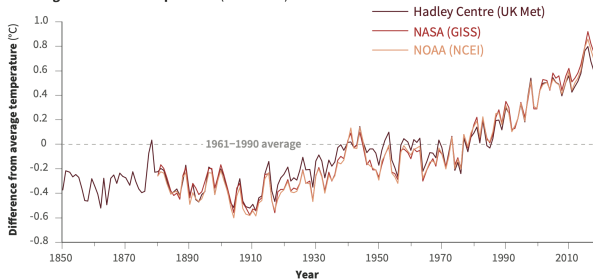
Evolution de la zone  
habitable

Références

# Evidences d'un réchauffement

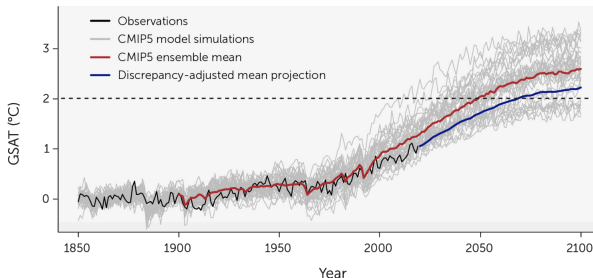
Wolff+ 2020

Annual global surface temperature (1850–2019)



## Projections futures :

Collins+ 2024



La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

# Autres indicateurs

Wolff+ 2020

La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

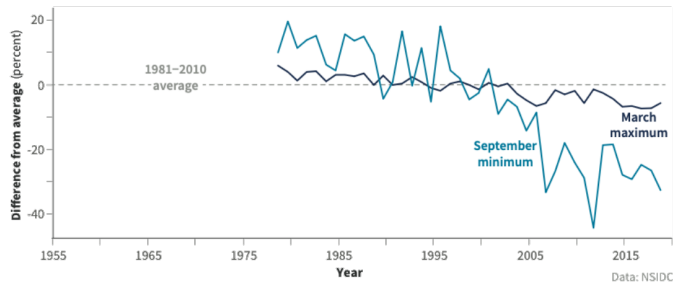
Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

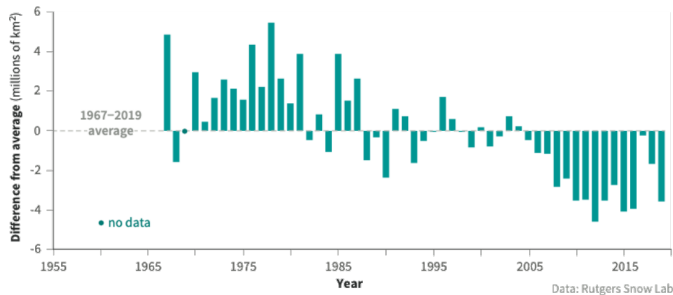
Evolution de la zone  
habitable

Références

Arctic sea ice extent in winter and summer (1979–2019)



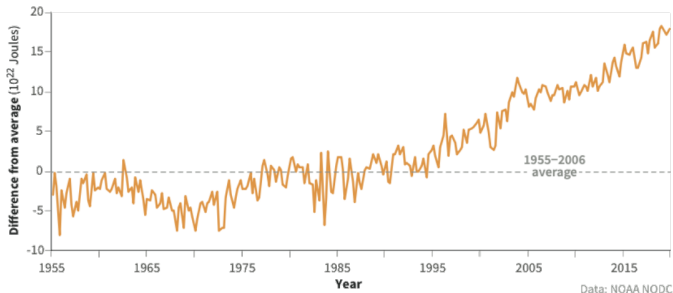
Northern Hemisphere June snow cover (1967–2019)



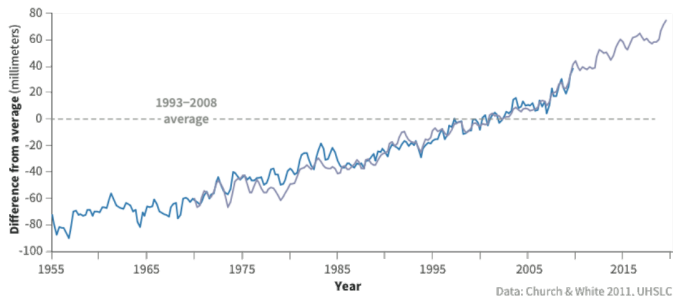
# Autres indicateurs

Wolff+ 2020

Upper ocean heat content (1955–2019)



Global sea level (1955–2019)



La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

# Rôle du Soleil ?

Wolff+ 2020

La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

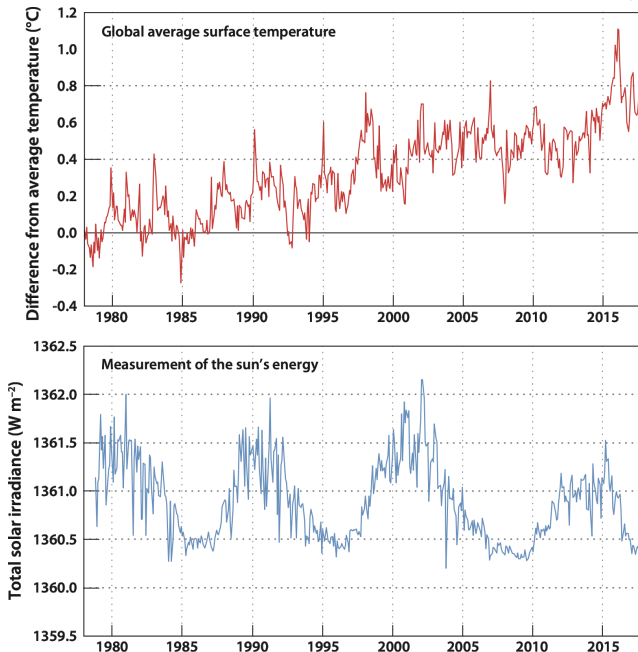
Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références



# Quelques mots sur nos émissions

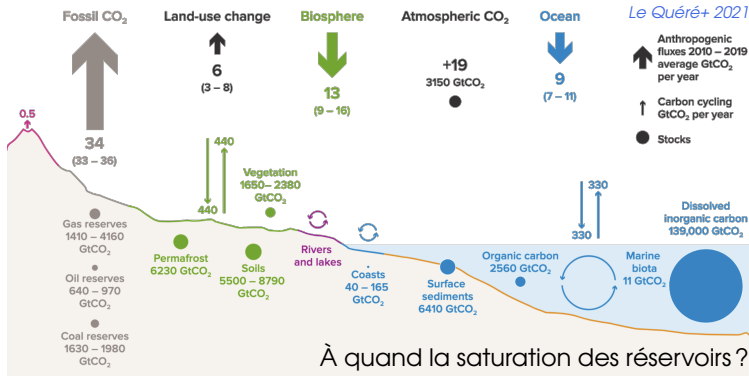
Le CO<sub>2</sub> est stocké dans différents réservoirs :

- atmosphère
- sols / biosphère
- océans

Nos émissions proviennent de :

- combustibles fossiles (34 Gt)
- changements de l'utilisation des sols (6 Gt)

Nos émissions ont été absorbées pour plus de la moitié par les sols (13 Gt) et les océans (9 Gt)



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



11. La Terre demain

Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

Evolution à long terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

Références



# Saturation des réservoirs

La **végétation** augmente avec un  $\text{CO}_2$  qui augmente  
Mais limitation de l'eau et des nutriments → saturation

*Le Quéré+ 2021*

Dans l'**océan**, formation de bicarbonate

→ acidification de l'eau

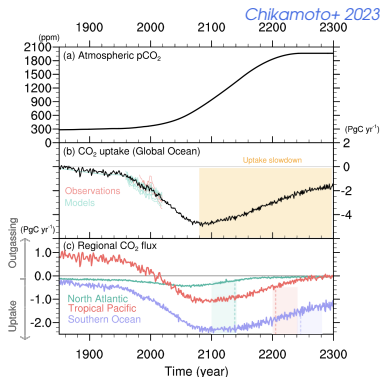
Plancton peu sensible au  $\text{CO}_2$ ,  
plus sensible aux nutriments  
(affectés par acidification)

Risque de dégradation de la  
chaîne alimentaire et de la  
photosynthèse océanique

Diminution de la capacité  
océanique à stocker le  $\text{CO}_2$

*Wolff+ 2020; Chikamoto+ 2023*

Effets du réchauffement seront plus fort à l'avenir  
Plus fort que le forcing orbital et les ères glaciaires ?



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

# Ères glaciaires : les 800 000 dernières années

La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

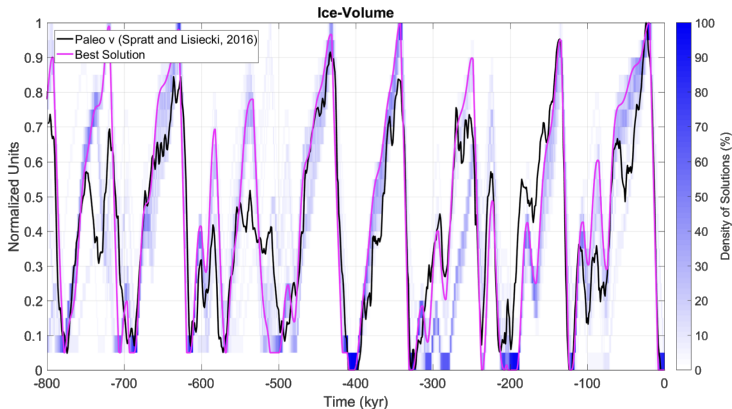
Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

*Talento & Ganopolski 2021*



Modèle climatique avec forcing orbital et CO<sub>2</sub> atmosphérique

Reproduit bien les 800 000 dernières années

Quelles prédictions pour l'avenir ?

# Ères glaciaires : les prédictions

La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

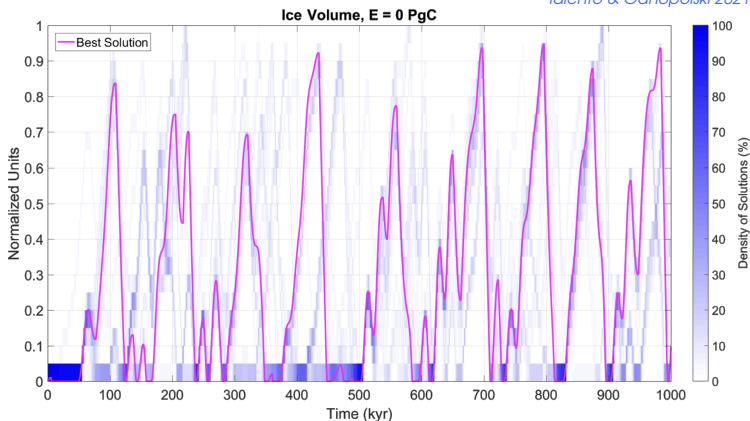
Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références



**Sans émission**, prochaine ère glaciaire dans 50 000 ans avec  
glaciation globale dans 90 000 ans

9 épisodes glaciaires dans le prochain million d'années (cycle  
de 100 000 ans comme dans le passé)

# Ères glaciaires : les prédictions

La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

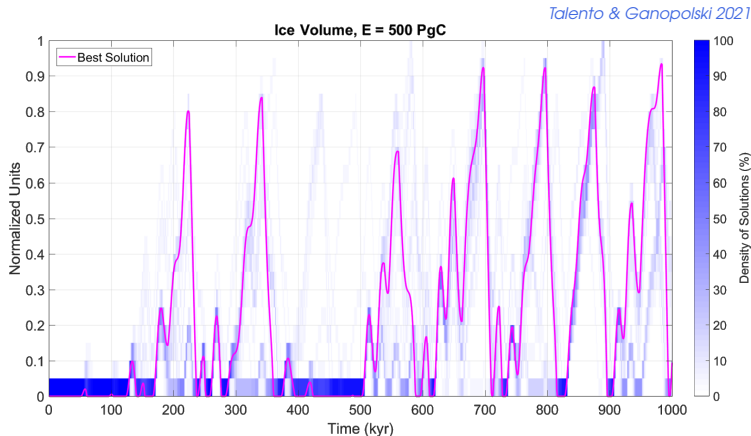
Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références



Avec émissions anthropogènes basses (avant 1959) :  
prochaine ère glaciaire dans 200 000 ans

Retour à la normale dans 500 000 ans

# Ères glaciaires : les prédictions

La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

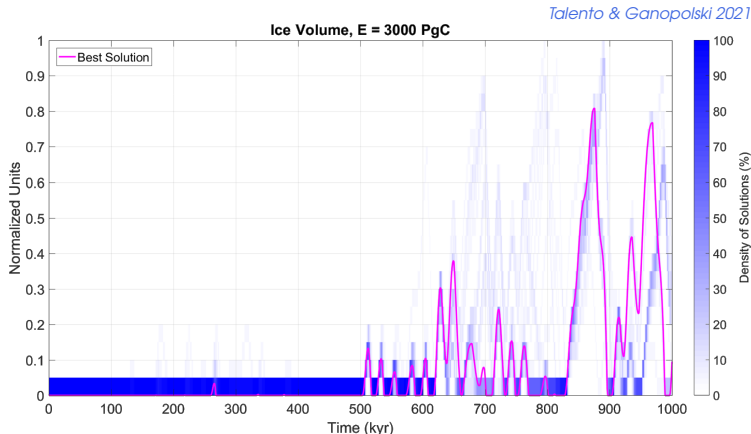
Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références



Avec émissions anthropogènes hautes (épuisement de tous les combustibles fossiles) :

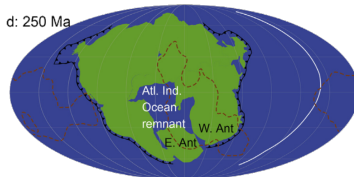
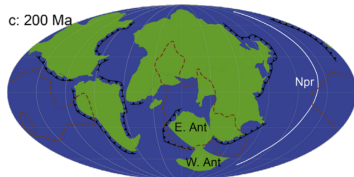
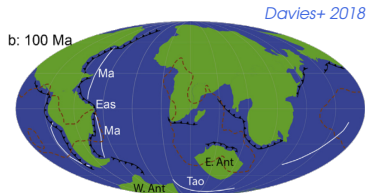
prochaine ère glaciaire dans 650 000 ans

Retour à la "normale" (?) dans 800 000 ans

# À plus long terme : la tectonique

La tectonique continue : en route vers un supercontinent

## Pangea Ultima



La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



### 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

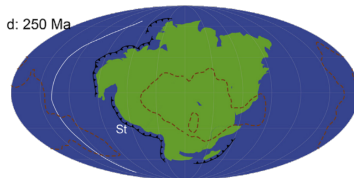
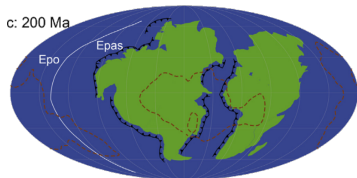
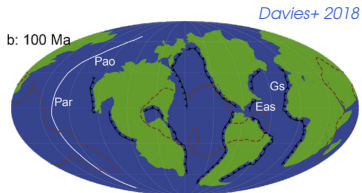
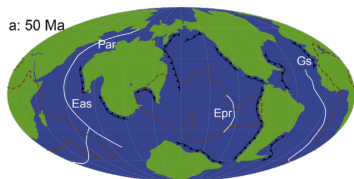
Références



# À plus long terme : la tectonique

La tectonique continue : en route vers un supercontinent

Aurica



La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

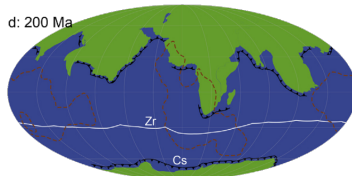
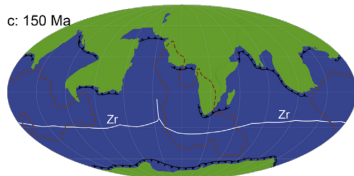
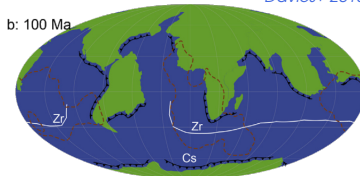
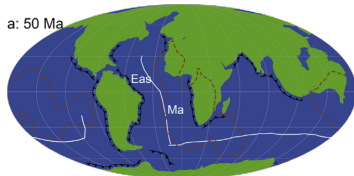
Références

# À plus long terme : la tectonique

La tectonique continue : en route vers un supercontinent

Amasia

*Davies+ 2018*



Cyclicité de 400 Ma

La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

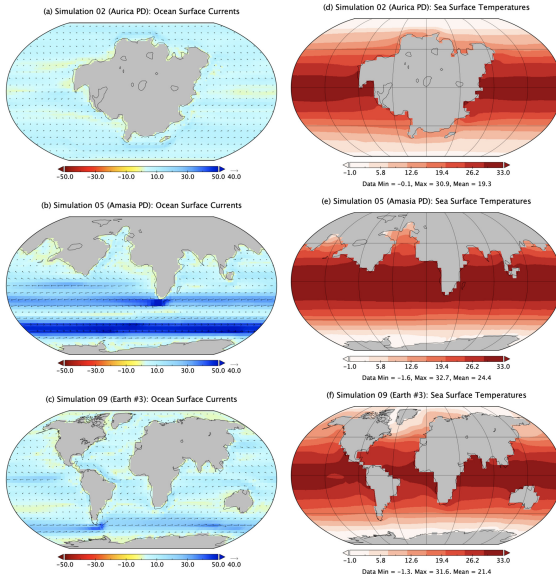
Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

## Effet climatique selon la disposition

Way+ 2021



### 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

# Fin de la tectonique

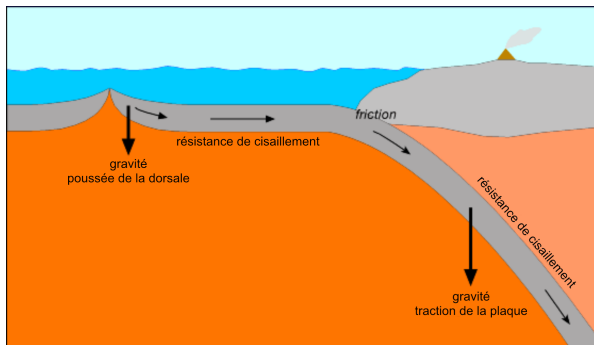
Chaleur interne de désintégration radioactive encore pour plusieurs milliards d'années, mais déclinante

Moins de chaleur à évacuer : plaques plus grandes

Refroidissement général : plaques plus épaisses

→ subduction plus efficace avant l'arrêt

*Ch. Scotese, in National Geographics 2018*



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

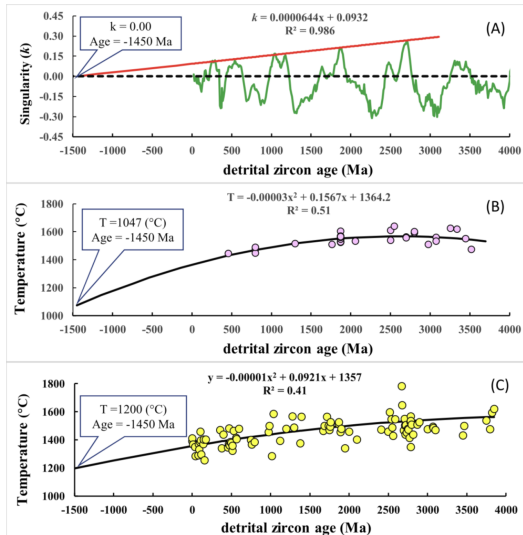
Références

# Fin de la tectonique

Difficile à estimer...

Extrapolation par les indices de refroidissement du manteau  
donne un arrêt dans 1,45 Ga

Cheng 2018



La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

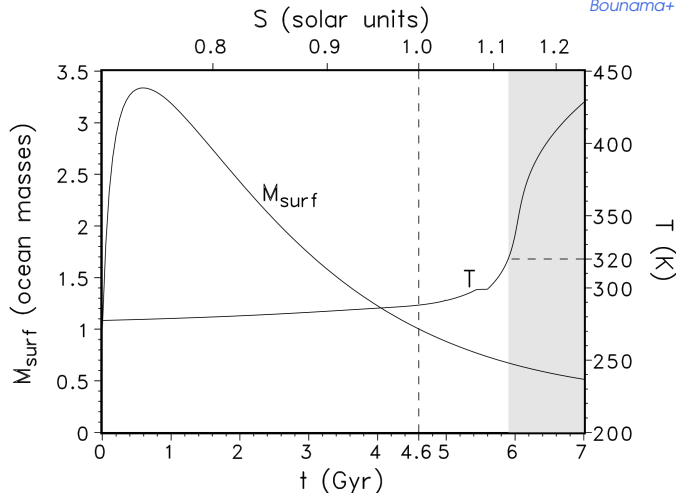
# Evolution des océans

Subduction emporte de l'eau dans le manteau

Une partie est dégazée mais une plus grande partie est absorbée par le manteau [Wallmann 2001](#)

Diminution de 27% dans le prochain 1-1,5 milliard d'années

[Bounama+ 2001](#)



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

Evolution à long terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

Références



# Evolution des océans

La luminosité du Soleil augmente inexorablement

Cela entraîne une augmentation de la température sur Terre

Lorsque l'augmentation atteindra 10%, la température de surface devrait dépasser la limite pour une situation de "serre humide", avec forte évaporation des océans ( $T_{sh} \simeq 45^\circ$  *Kasting 1988*)

Attendu dans environ 1 milliard d'années

Lorsque la luminosité augmente de 35% (dans 4 milliards d'années), on entre en effet de serre incontrôlable et la température de surface atteint le point critique de l'eau ( $T_{runaway} = 374^\circ$ ) *Brownlee2010a*



## 11. La Terre demain

Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

Evolution à long terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

Références

# Evolution du Soleil

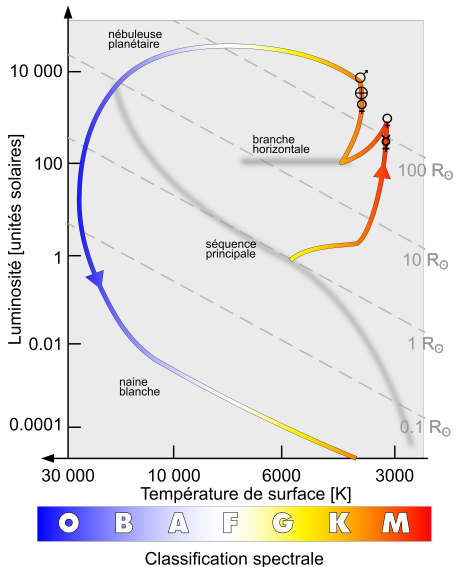
Le Soleil est à mi-chemin de sa phase de brûlage de l'hydrogène

Il lui reste environ 4 Ga

Sa luminosité augmente progressivement

À la fin de la fusion de l'H, il deviendra une géante rouge

Son rayon approchera ou dépassera l'orbite de Vénus (la Terre ?)



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

Evolution à long terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

Références

# Evolution du Système solaire

La Terre, une planète vivante dans le cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

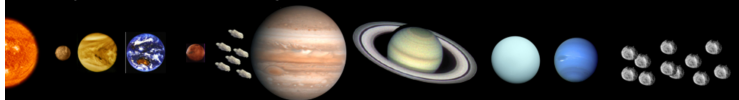
Evolution à long terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

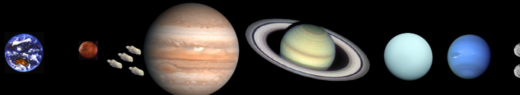
Références

## Le Système solaire aujourd'hui



## Le Soleil devenu géante rouge

Mercure et Vénus avalées (la Terre ?)



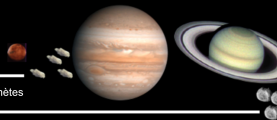
Les orbites des planètes externes s'élargissent

## Le Soleil devenu naine blanche

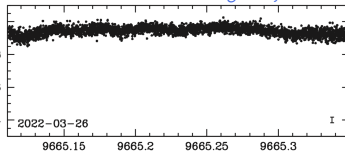
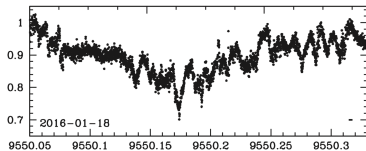
Disque de débris de planètes / astéroïdes



Déstabilisation des orbites des astéroïdes / comètes



# Observations



Aungwerojwit+ 2024



La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

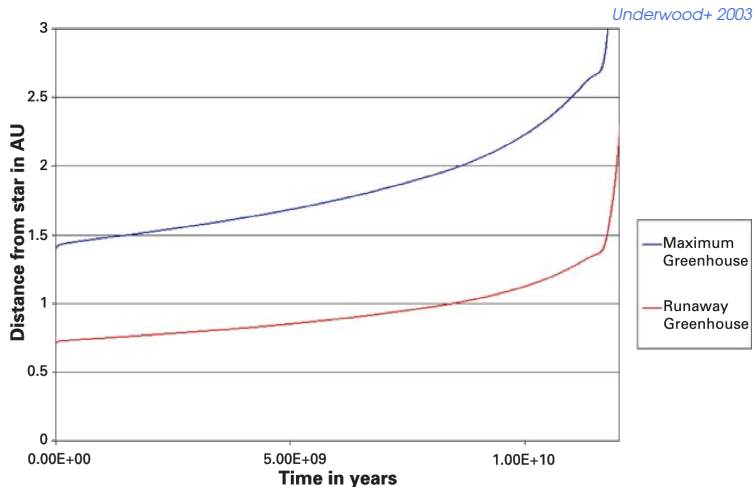
Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

# Evolution de la zone habitable



Evolution de la luminosité ↗  
→ plus d'énergie déposée sur la planète

Evolution de la température ↘  
→ IR plus efficaces pour chauffer la planète

La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

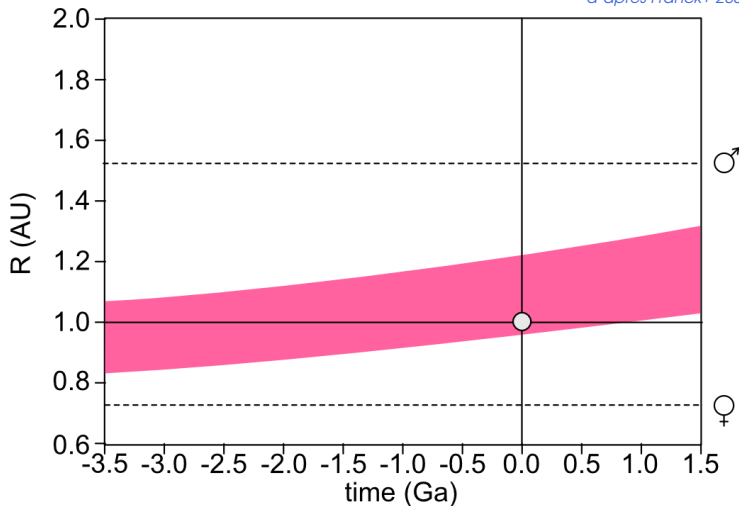
Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

# Evolution de la zone habitable

d'après Franck+ 2000



Modèle d'évolution de la zone habitable avec bilan  $\text{CO}_2$   
(océan / volcanisme) aux taux actuels

La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

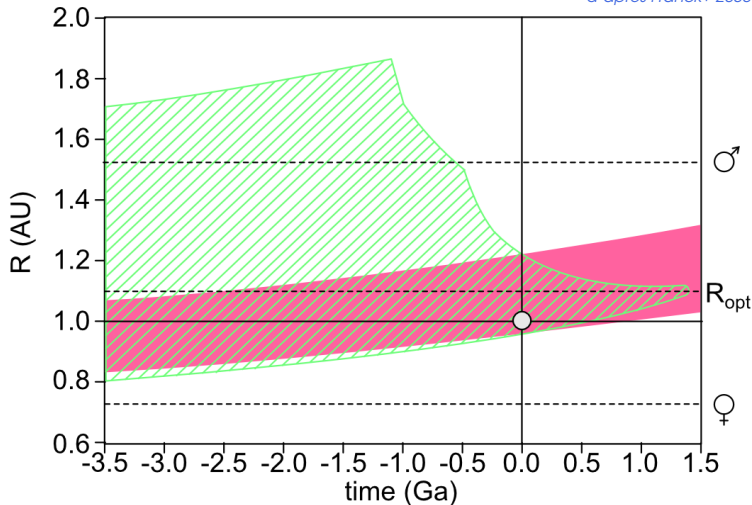
Evolution de la zone  
habitable

Références



# Renforcements, inhibitions

d'après Franck+ 2000



Modèle d'évolution de la zone habitable avec bilan  $\text{CO}_2$   
(océan / volcanisme) à taux variables

La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

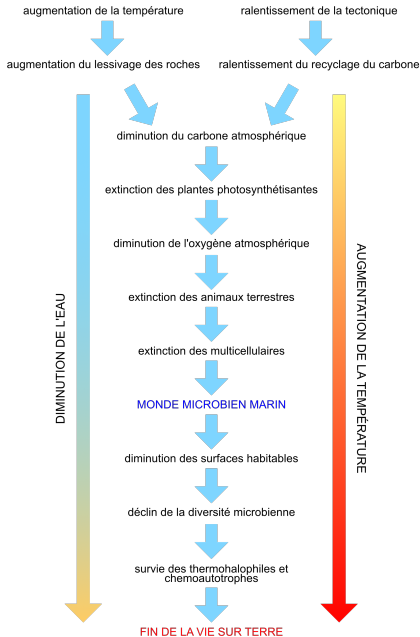
Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

# Extinction de la vie sur Terre

d'après O'Malley-James+ 2013



La Terre, une planète  
vivante dans le  
cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

# Références I

- Aungwerojwit, Gänsicke, Dhillon et al. 2024, *MNRAS*, 530, 117 (ADS)
- Bounama, Franck, & von Bloh 2001, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5, 569 (ADS)
- Cheng 2018, *Gondwana Research*, 63, 268 (ADS)
- Chikamoto, DiNezio, & Lovenduski 2023, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2022GL101954 (ADS)
- Collins, Beverley, Bracegirdle et al. 2024, *Frontiers in Science*, 2, 1340323 (ADS)
- Davies, Green, & Duarte 2018, *Global and Planetary Change*, 169, 133 (ADS)
- Franck, Block, von Bloh et al. 2000, *Plan. & Space Sci.*, 48, 1099 (ADS)
- Kasting 1988, *Icarus*, 74, 472 (ADS)
- Le Quéré, Friedlingstein, Gruber et al. 2021, *The Royal Society Projects, Climate change : science and solutions*, Briefing 7
- O'Malley-James, Greaves, Raven, & Cockell 2013, *International Journal of Astrobiology*, 12, 99 (ADS)
- Talento & Ganopolski 2021, *Earth System Dynamics*, 12, 1275 (ADS)
- Underwood, Jones, & Sleep 2003, *International Journal of Astrobiology*, 2, 289 (ADS)
- Wallmann 2001, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 65, 2469 (ADS)
- Way, Davies, Duarte, & Green 2021, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e09983 (ADS)
- Wolff, Fung, Hoskins et al. 2020, *The Royal Society Projects*