

# 10A001 - ASTRONOMIE GÉNÉRALE

La Terre, une planète vivante dans le cosmos

11. La Terre demain

25 novembre 2025

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

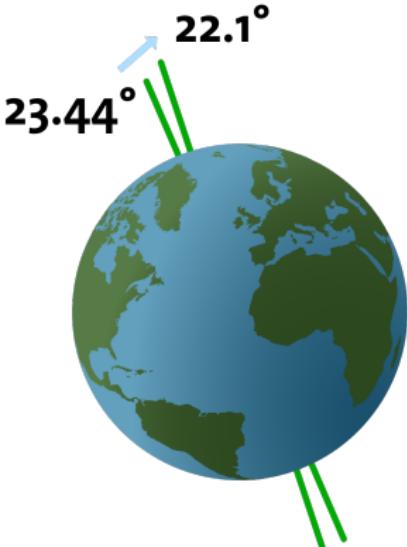
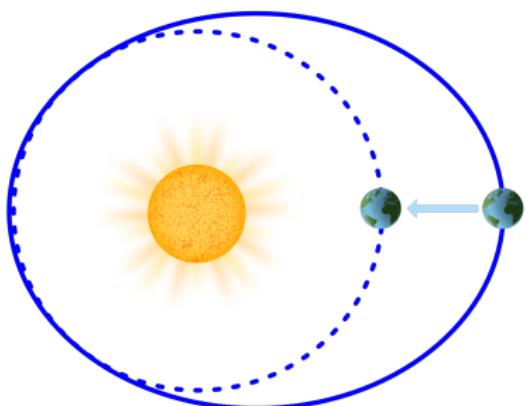


Sylvia Ekström  
Département d'Astronomie  
Université de Genève



# 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

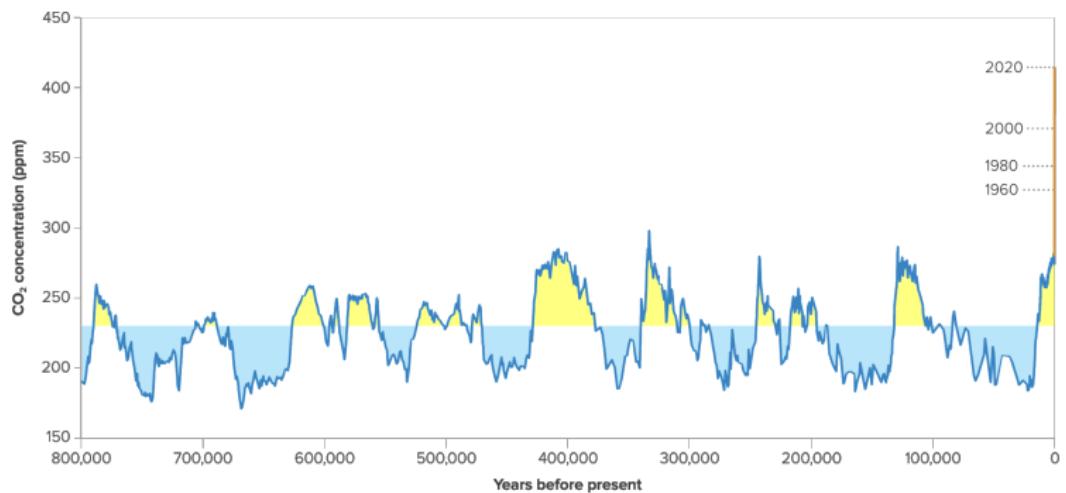
Evolution du Soleil

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 émission ?

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

La Terre, une planète vivante dans le cosmos

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 CO<sub>2</sub> aux conditions climatiques



réactions chimiques plus rapides



consommation accrue du CO<sub>2</sub>



Refroidissement



réactions chimiques plus lentes



consommation moindre du CO<sub>2</sub>



Réchauffement

## 11. La Terre demain

Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

Evolution à long terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

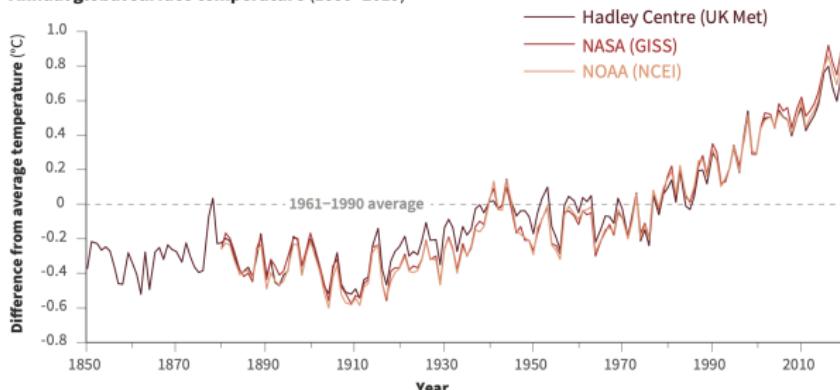
Références



# Evidences d'un réchauffement

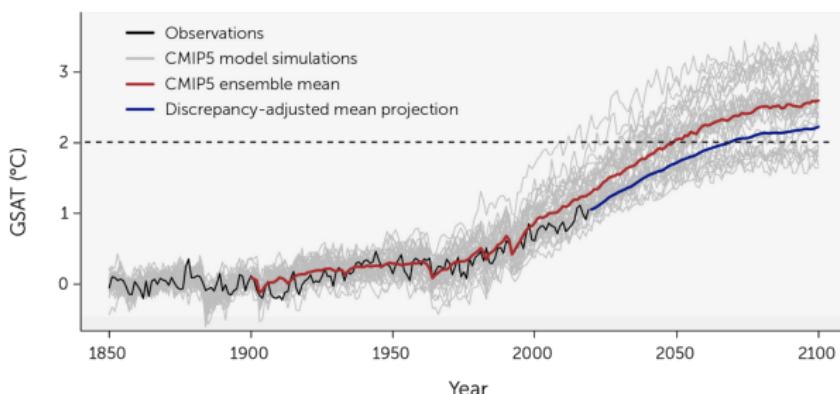
Wolff+ 2020

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

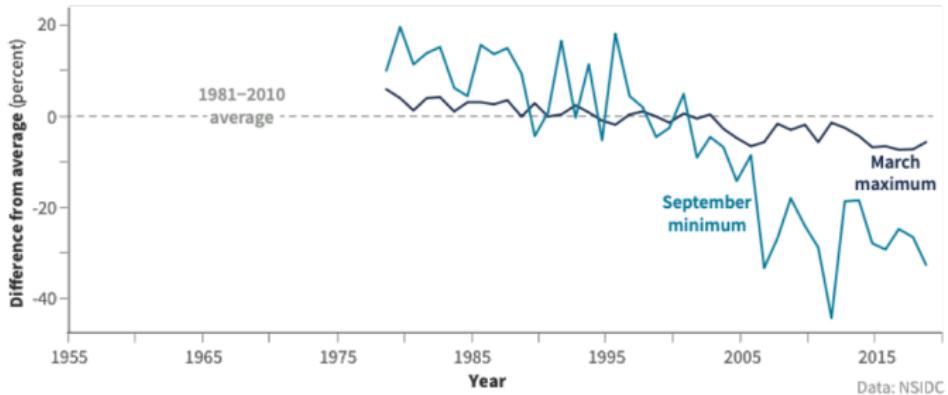
Evolution de la zone habitable

Références

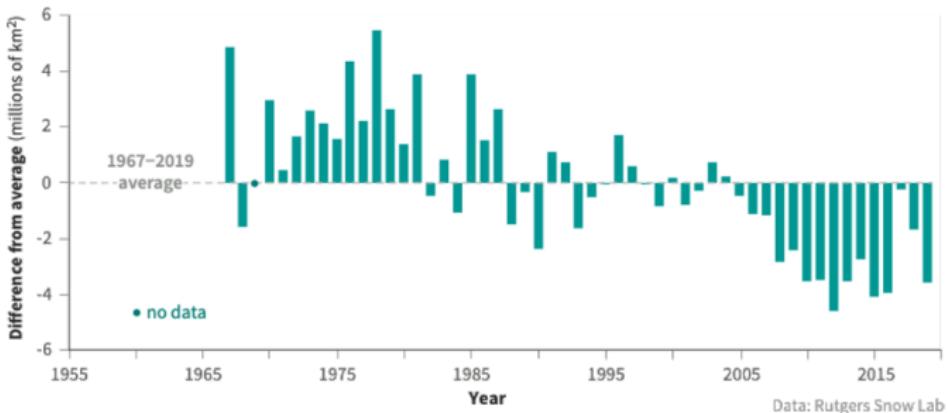
## Autres indicateurs

Wolff+ 2020

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



Northern Hemisphere June snow cover (1967–2019)



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

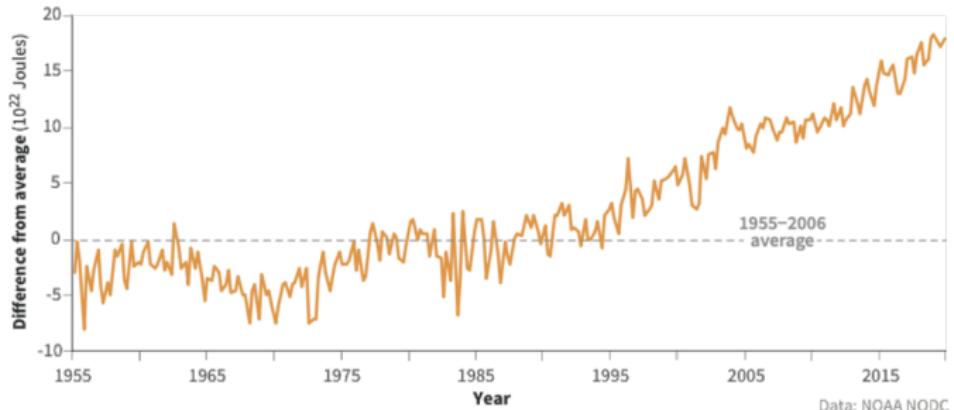
Evolution de la zone habitable

Références

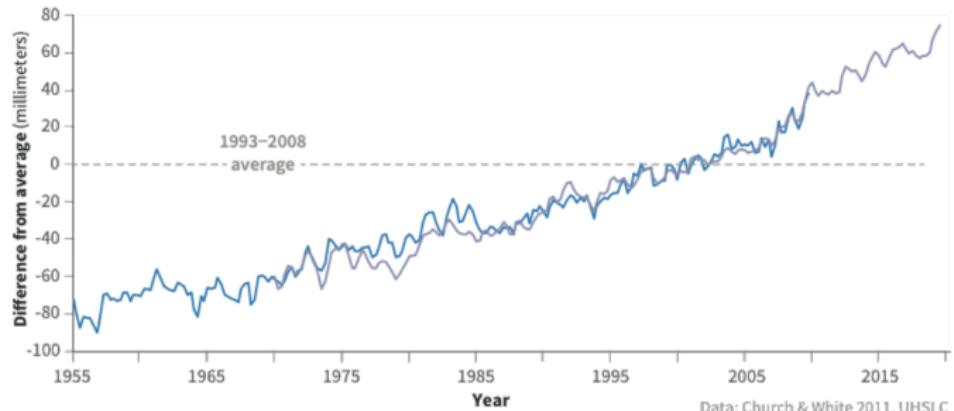
## Autres indicateurs

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

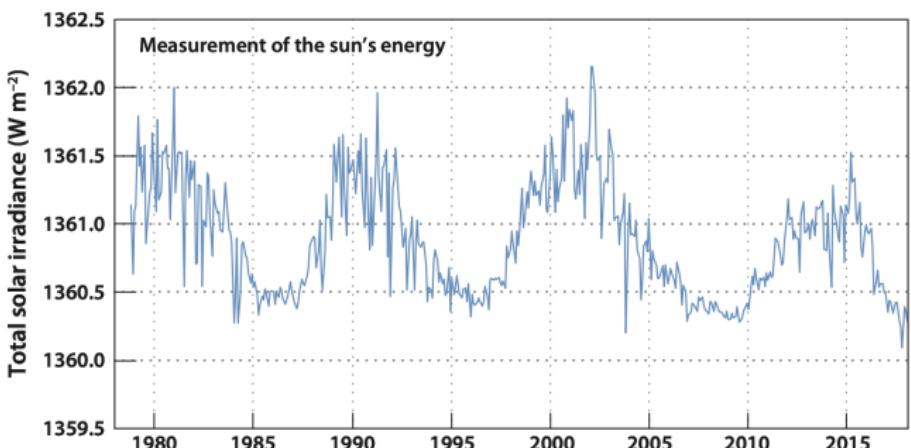
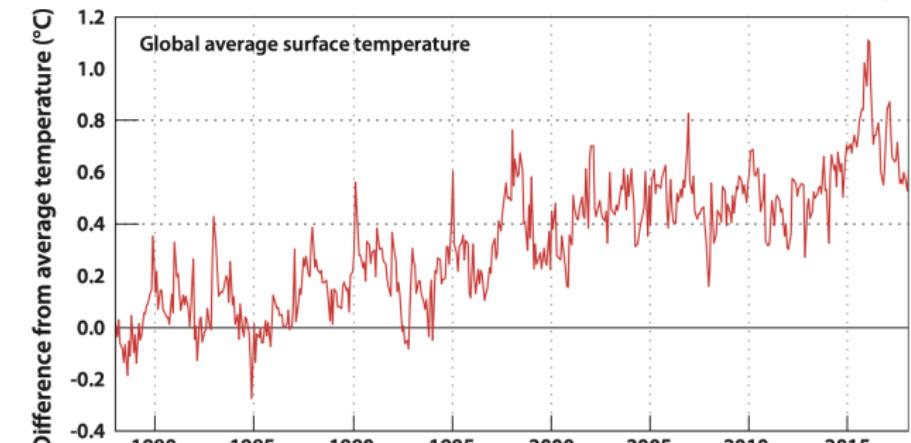
Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références

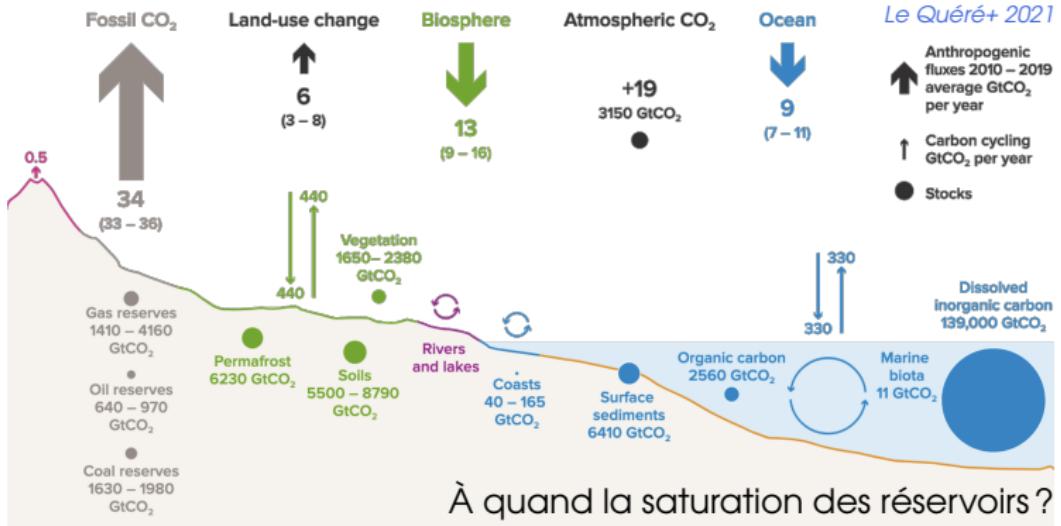


# Quelques mots sur nos émissions

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

- atmosphère
- sols / biosphère
- océans

Nos émissions 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

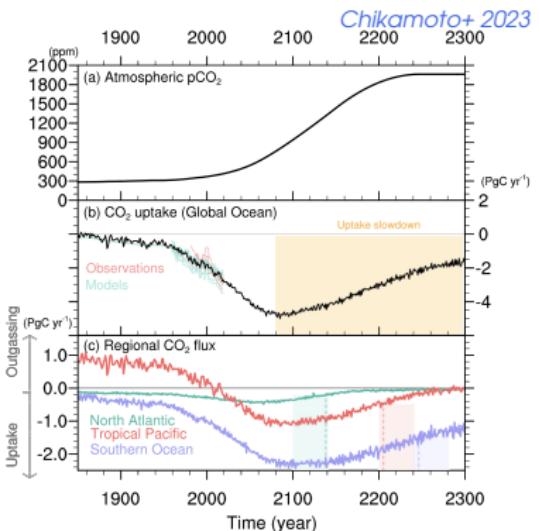
Dans l'**océan**, formation de bicarbonate  
→ acidification de l'eau

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

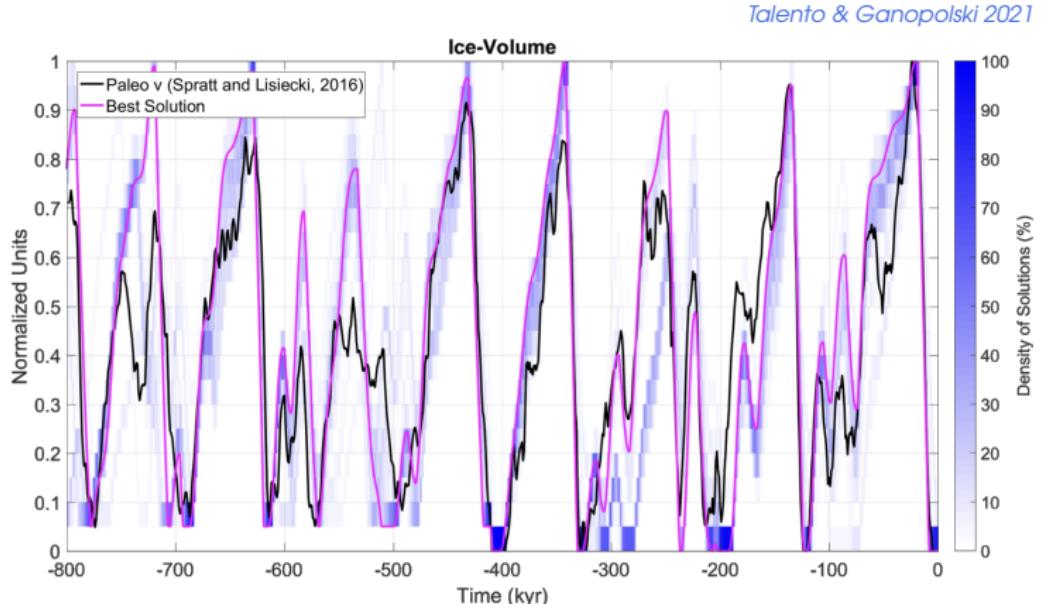
Evolution de la zone habitable

Références

# Ères glaciaires : les 800 000 dernières années



## 11. La Terre demain



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



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

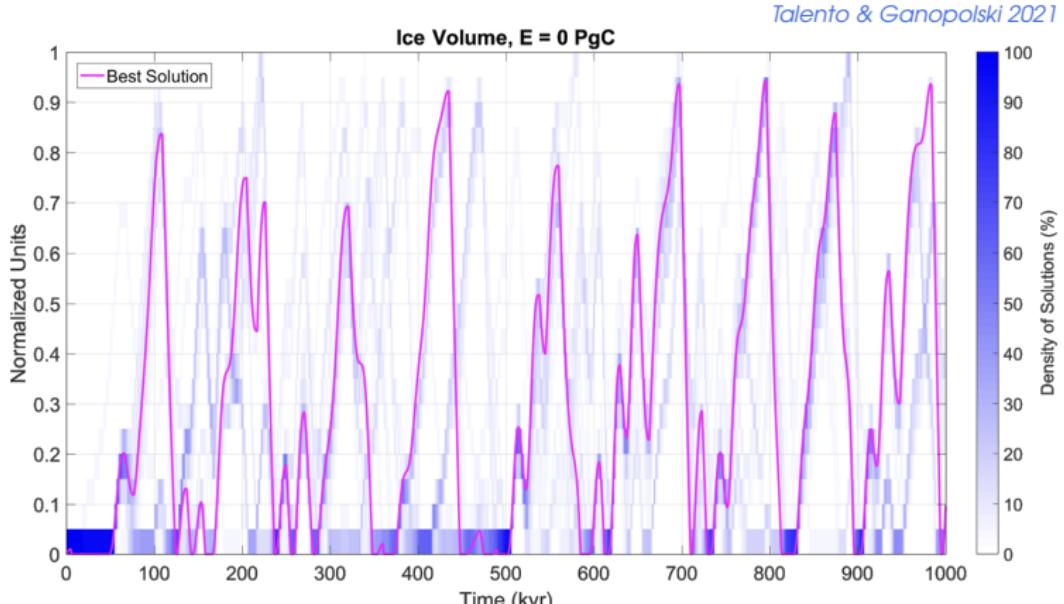
Evolution à moyen  
terme

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



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

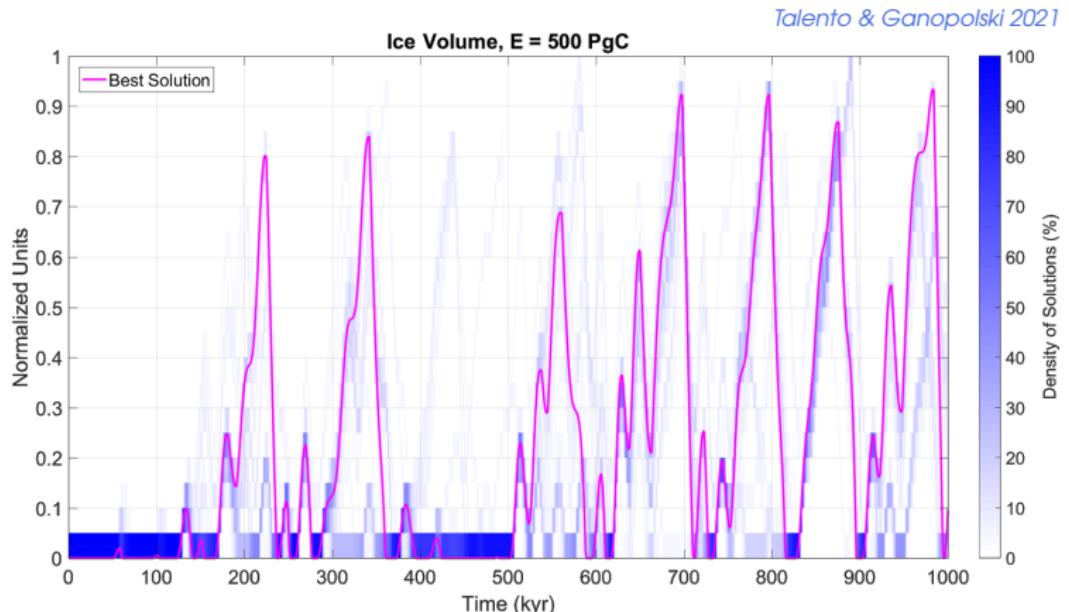
Evolution à moyen  
terme

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



## 11. La Terre demain

Evolution à court  
terme

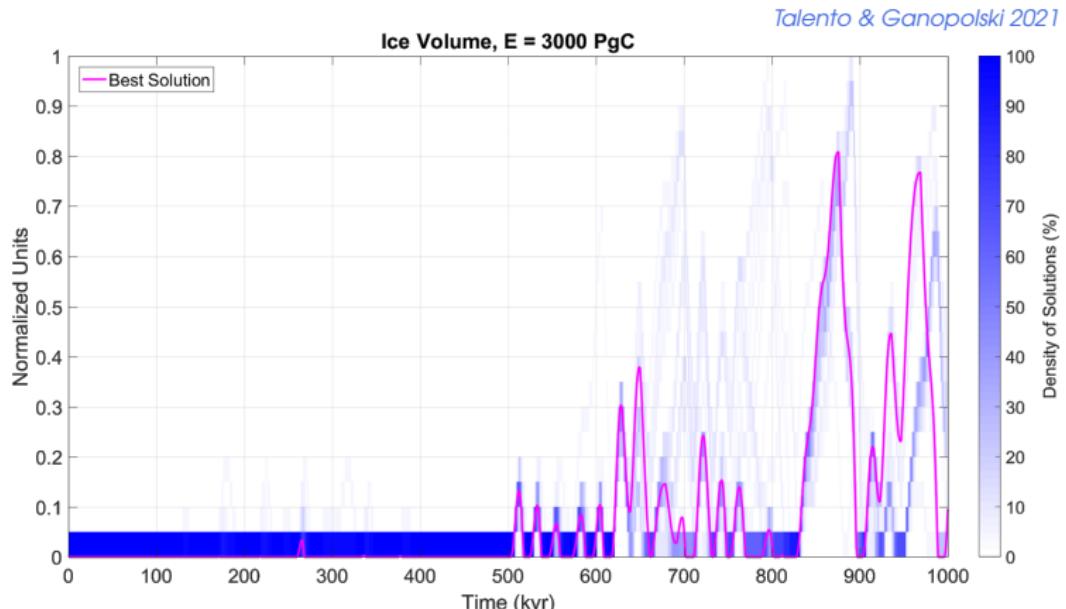
Evolution à moyen  
terme

Evolution à long  
terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone  
habitable

Références



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

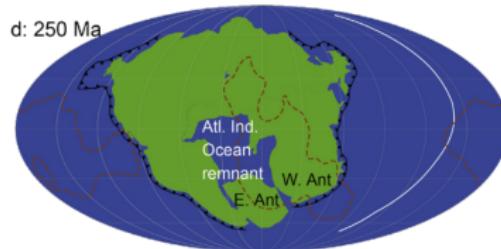
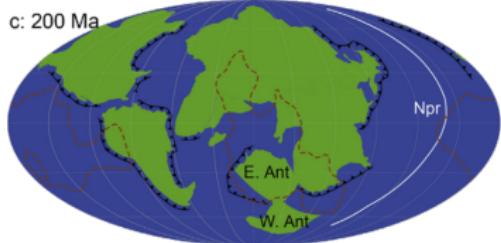
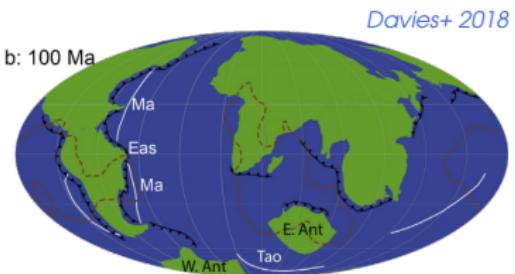
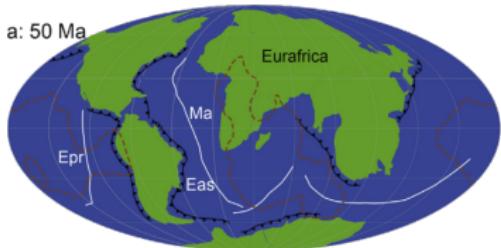
prochaine ère glaciaire dans 650 000 ans

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

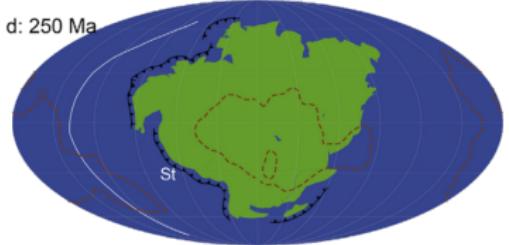
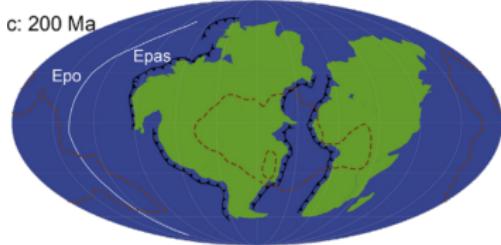
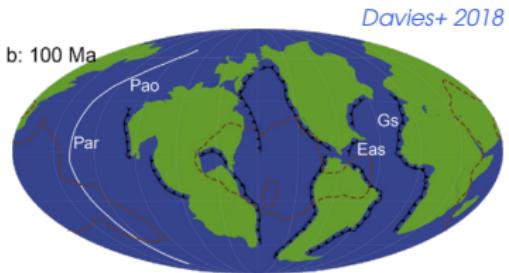
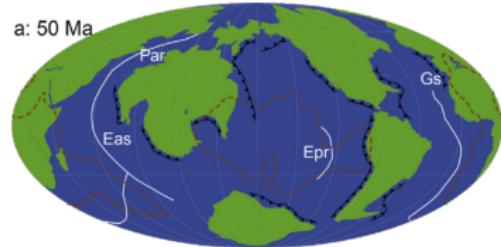
Evolution de la zone habitable

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

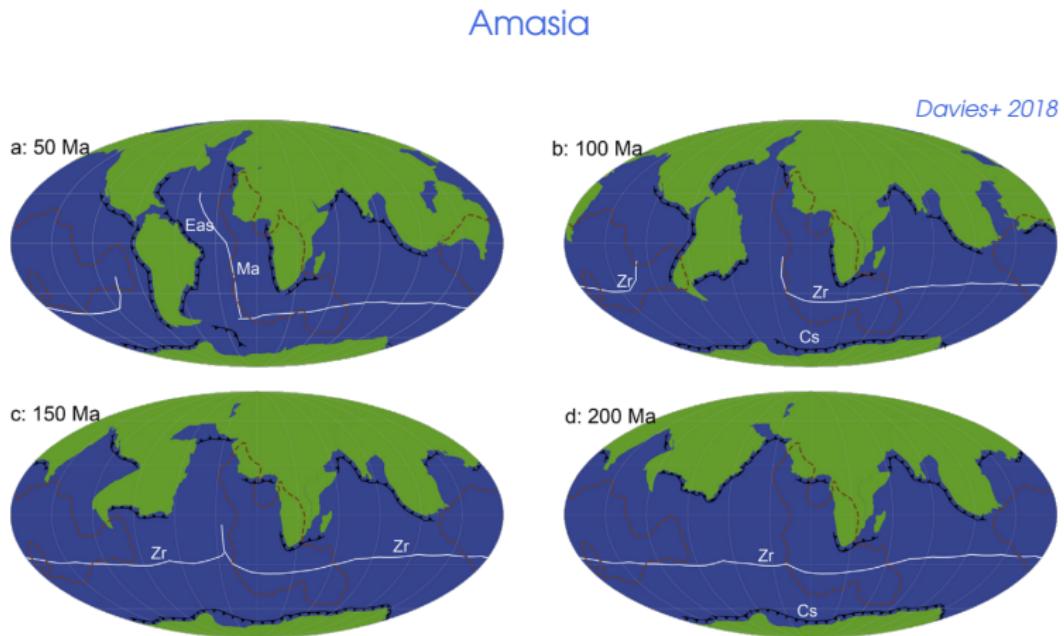
Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

Références

# À plus long terme : la tectonique

La tectonique continue : en route vers un supercontinent



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

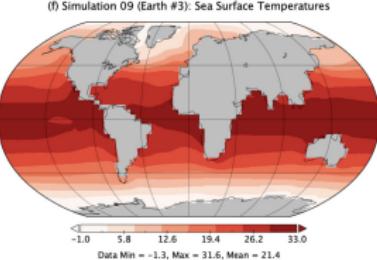
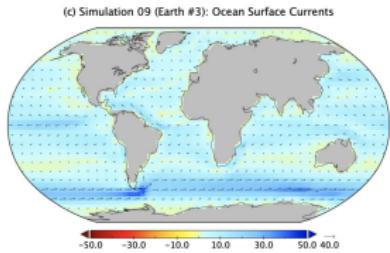
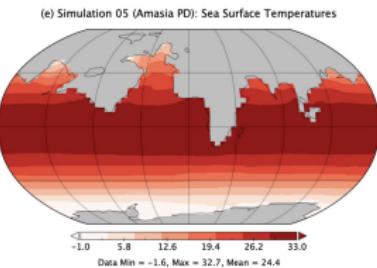
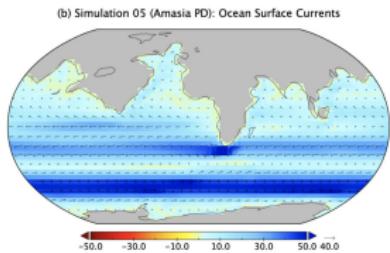
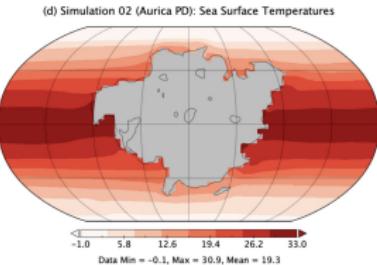
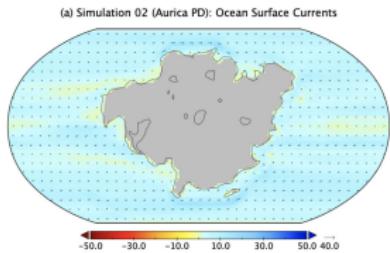
Références

# Effets de la tectonique

## 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

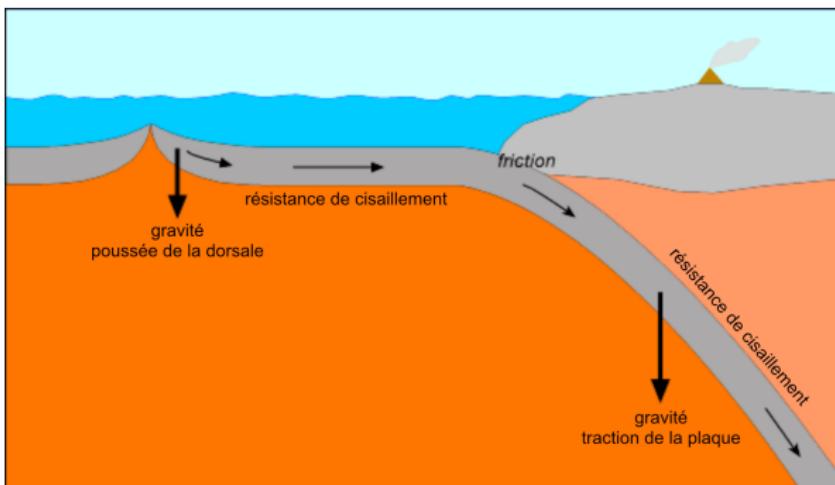
# Fin de la tectonique

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 Geographic 2018*



Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

Evolution à long terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

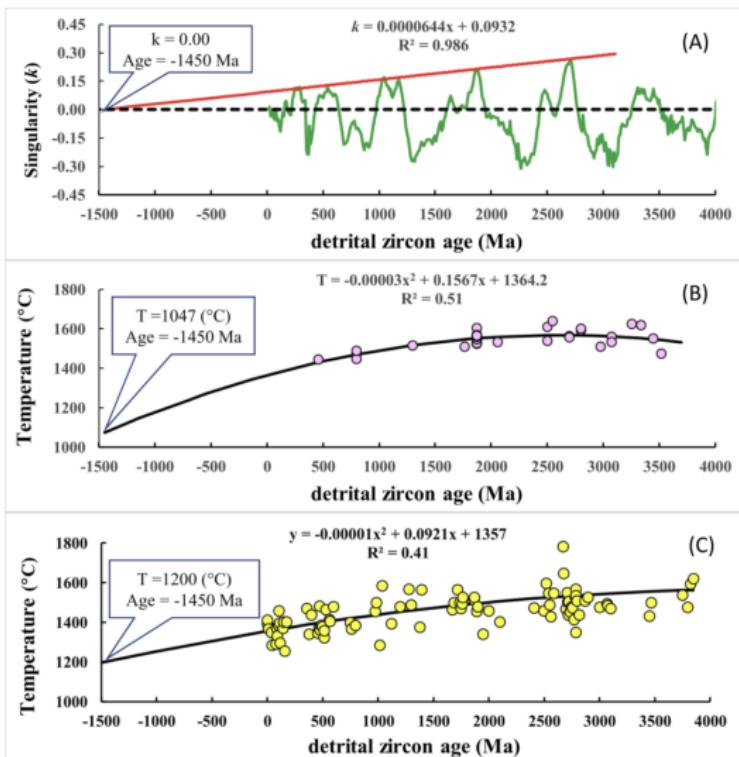
Références

# Fin de la tectonique

Difficile à estimer...

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

Cheng 2018



## 11. La Terre demain

Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

Evolution à long terme

Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

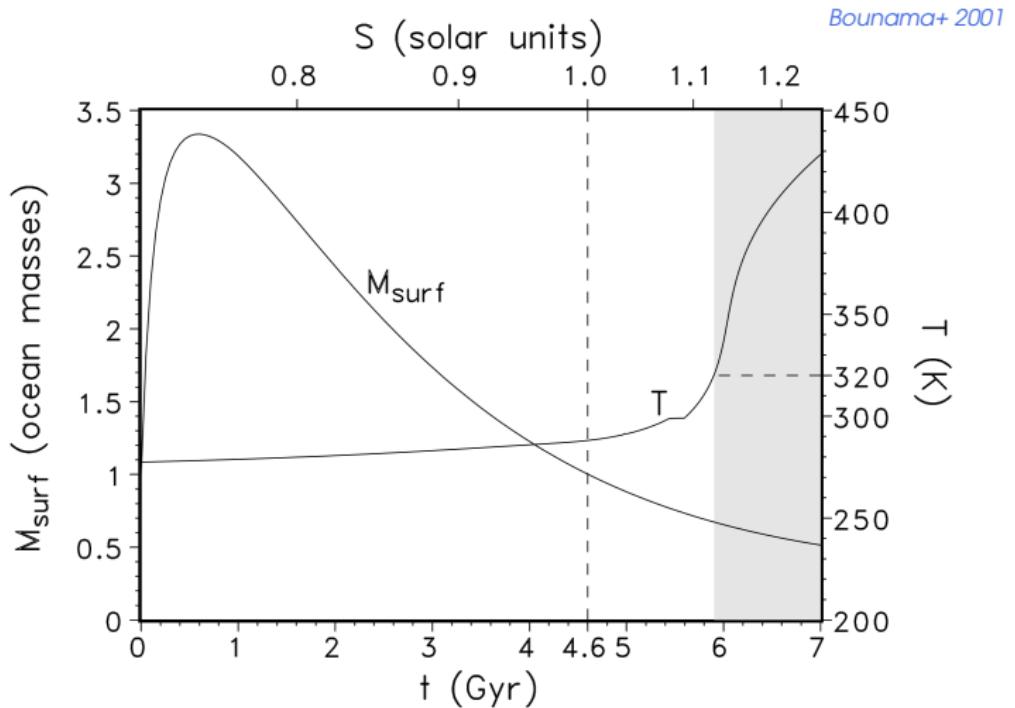
Références

# 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



# 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

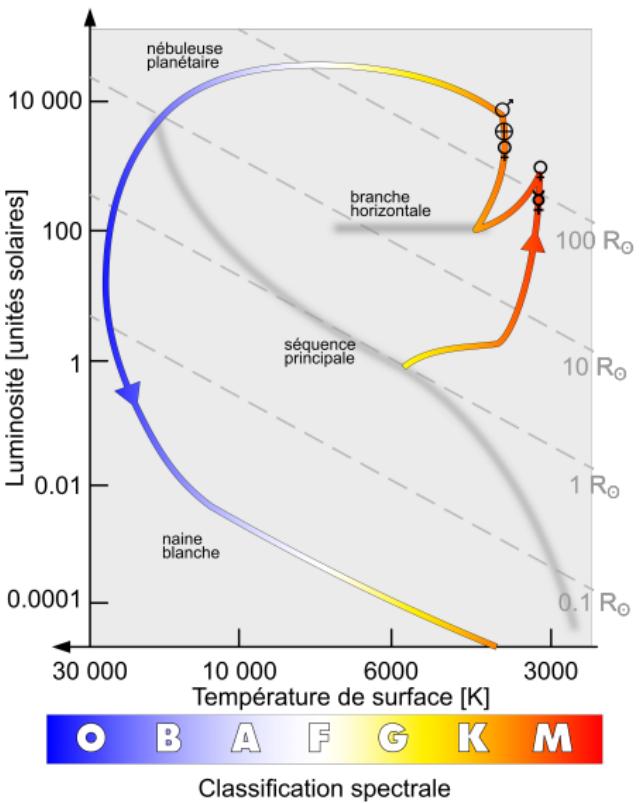
Le Soleil est à mi-chemin de sa phase de brûlage de l'hydrogène

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

## Le Système solaire aujourd'hui



## Le Soleil devenu géante rouge



## Le Soleil devenu naine blanche



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

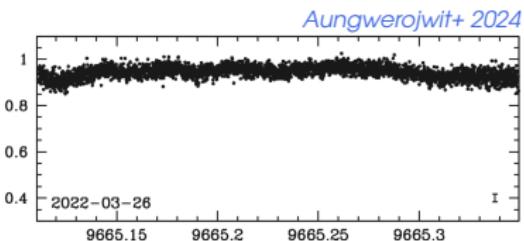
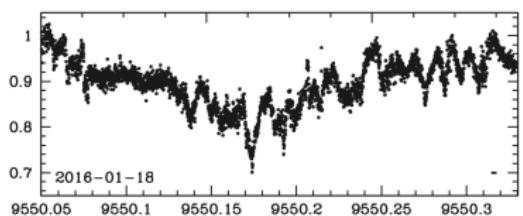
Evolution à long terme

## Evolution du Soleil

Evolution de la zone habitable

Références

# Observations



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



## 11. La Terre demain

Evolution à court terme

Evolution à moyen terme

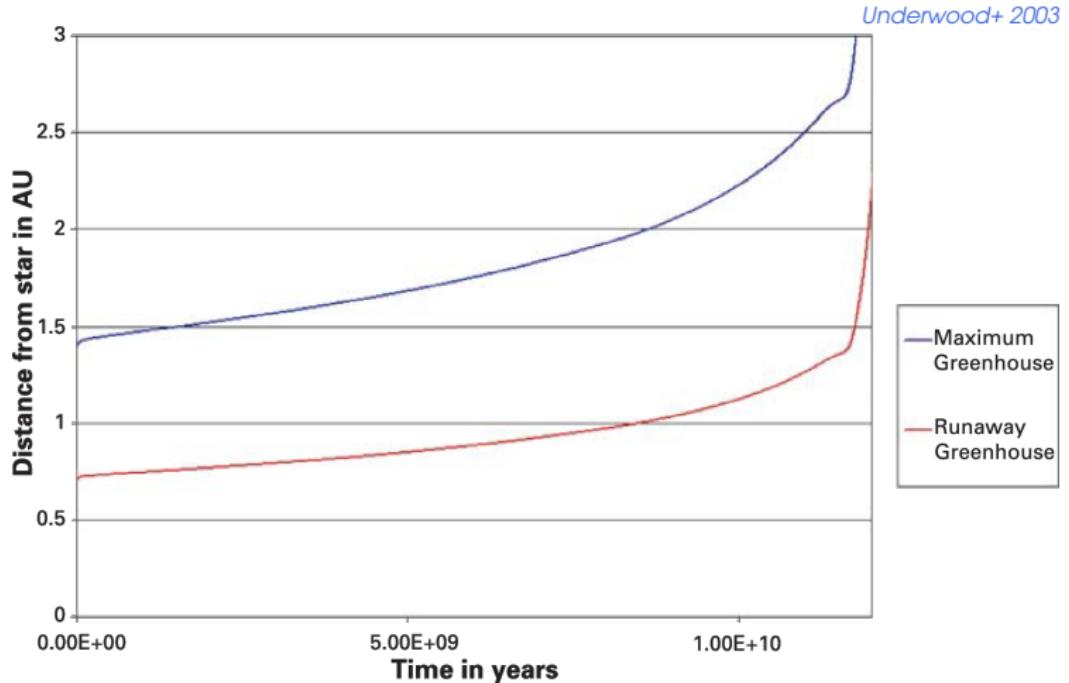
Evolution à long terme

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

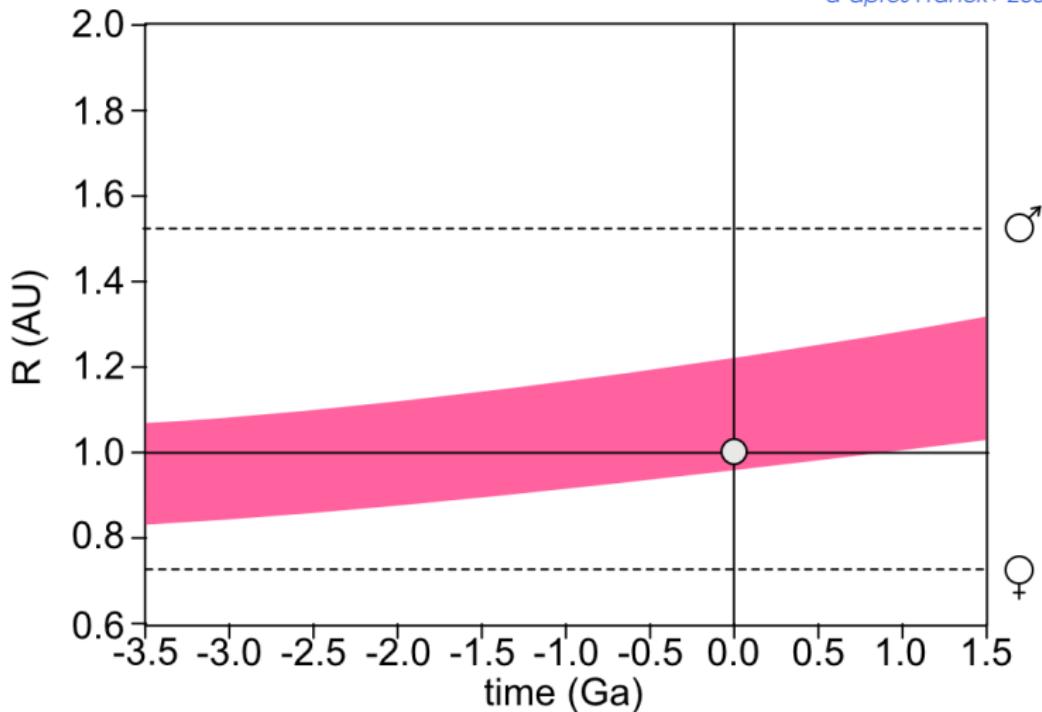
Evolution du Soleil

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

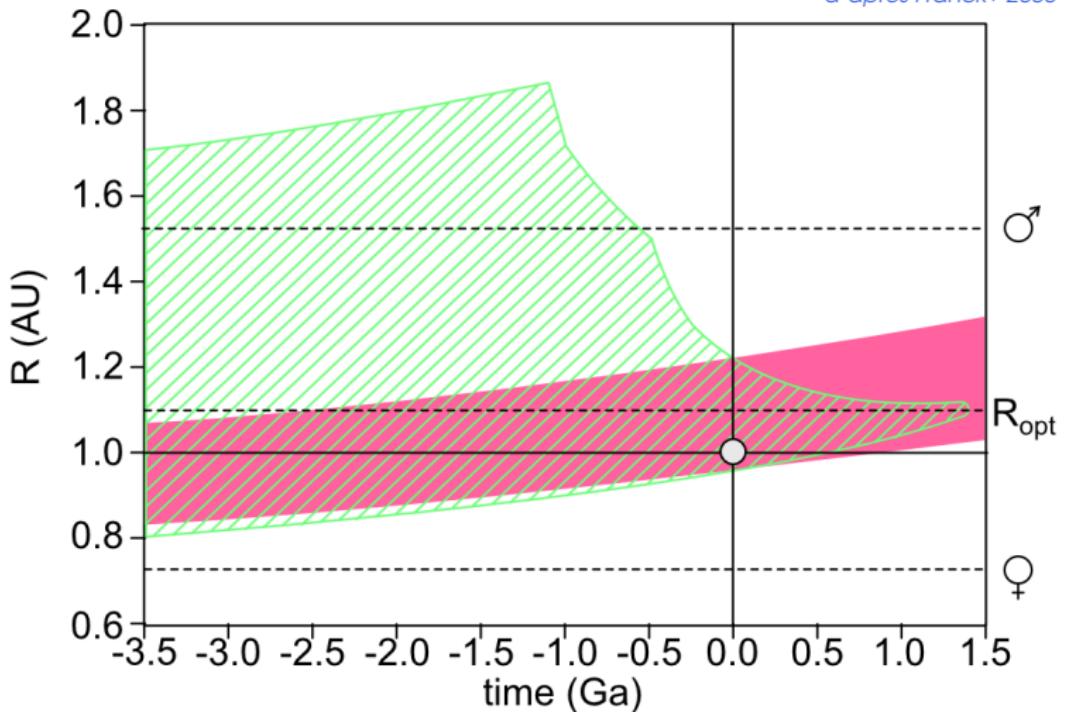
Evolution du Soleil

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

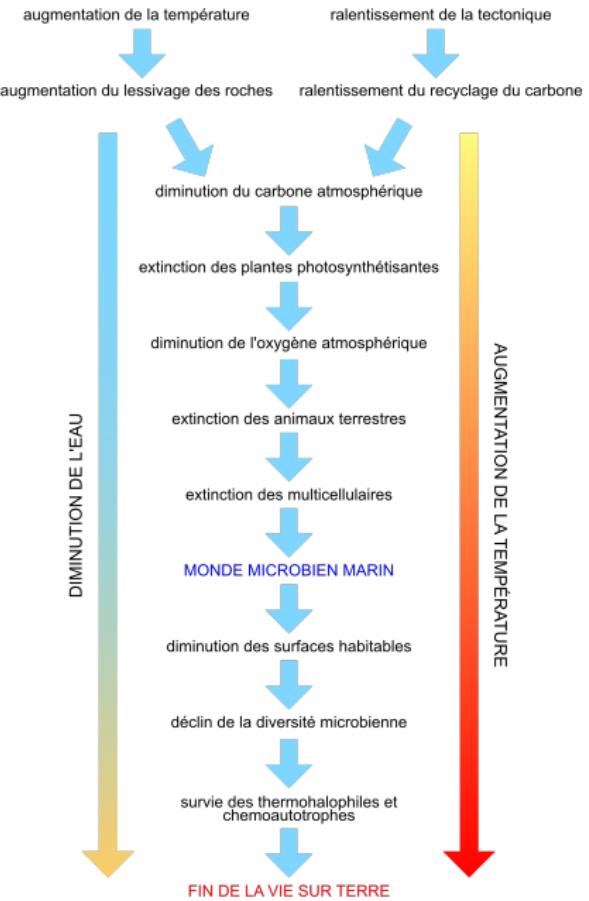
Evolution du Soleil

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*