

Détection de seuils critiques pour le climat grâce à la modélisation par réseaux climatiques

Maura Brunetti

Groupe de Physique Appliquée et Institut de Sciences de l'Environnement

Université de Genève

Suisse



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**



Schweizerischer Nationalfonds
Fonds national suisse
Fondo nazionale svizzero
Swiss National Science Foundation



BIOGEODYNAMICS

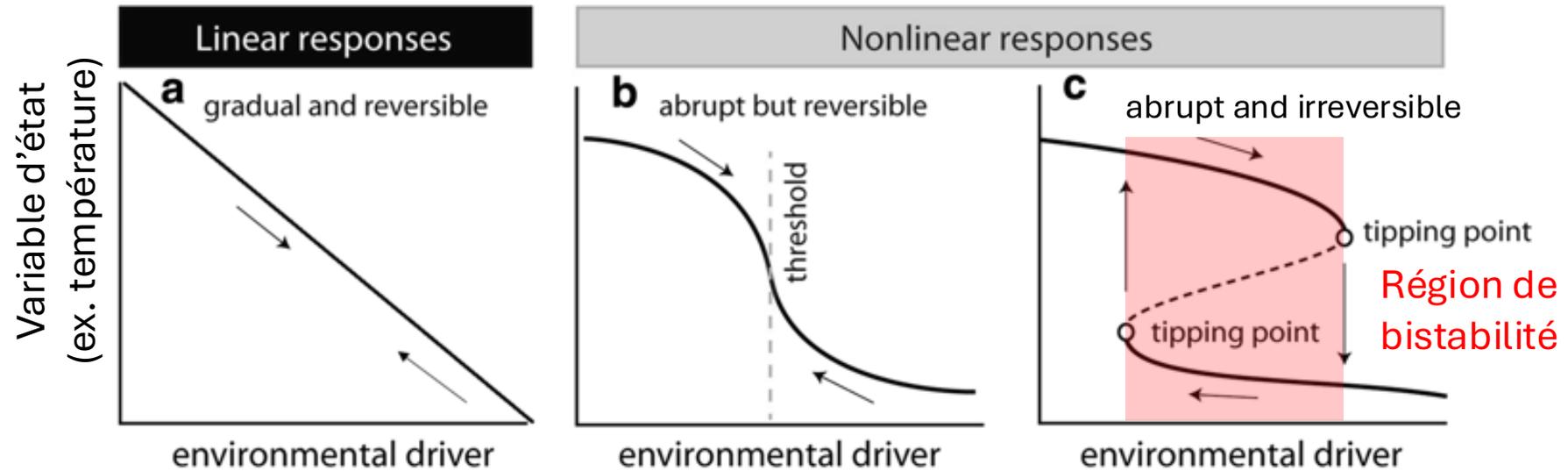


cost
EUROPEAN COOPERATION
IN SCIENCE AND TECHNOLOGY

Outline

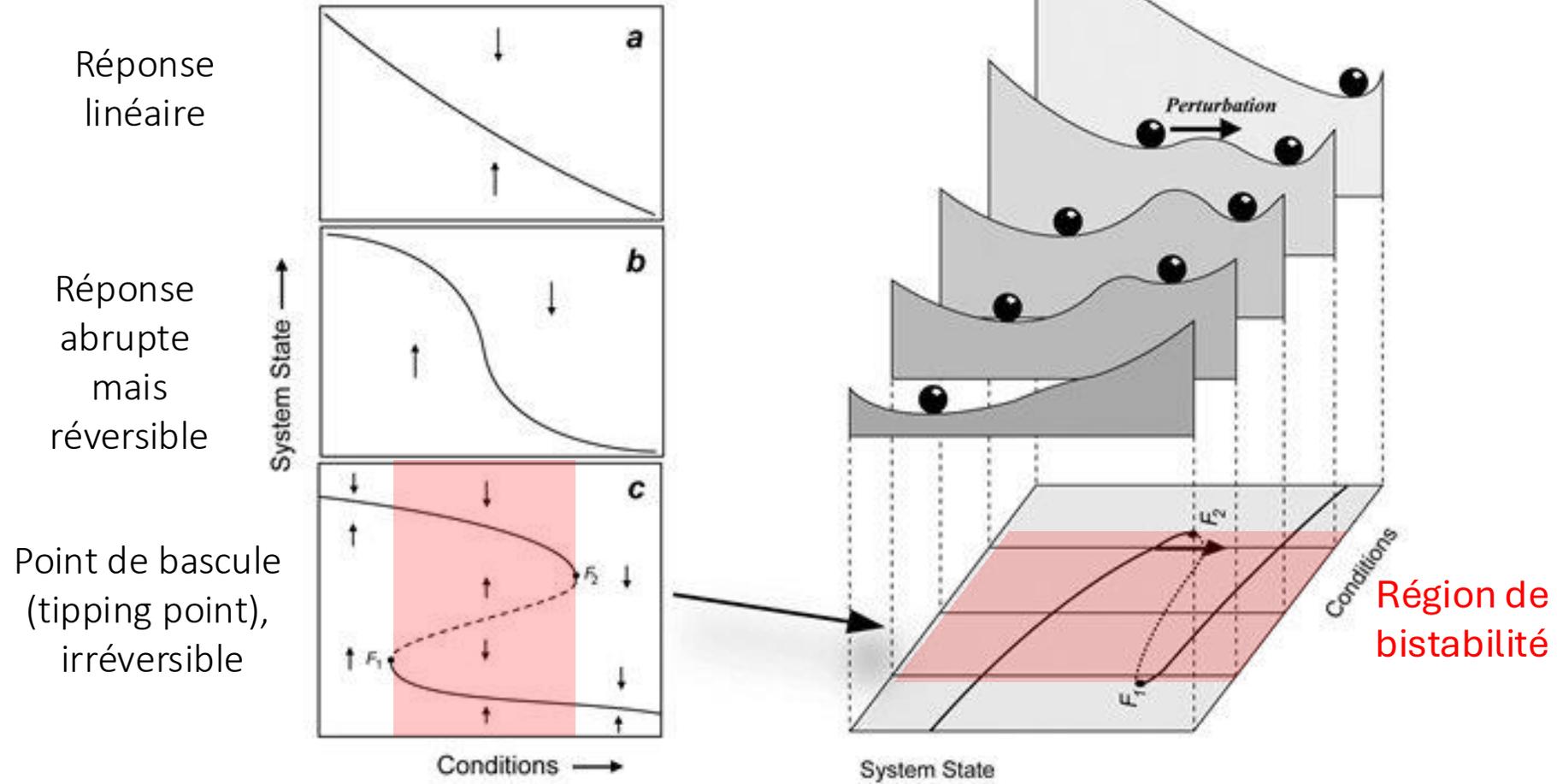
- Points de bascule
- Points de bascule dans le système climatique
- Comment les étudier (modélisation, exemples du passé géologique...)
- Configurations simplifiées: planète-océan
- Réseaux climatiques: définition, construction, indicateurs
- Signaux d'alerte précoce
- Résultats
- Conclusion et développements futurs

Systemes linéaires et non linéaires



Latty & Dakos, Biodiversity & Conservation (2019)

Points de bascule



Latty and Dakos, *Biodiversity & Conservation* (2019)
Scheffer *et al.* *Nature* (2001)

Exemples de points de bascule dans les systèmes naturels



Angle d'inclinaison du kayak



Limite de rupture
d'une corde

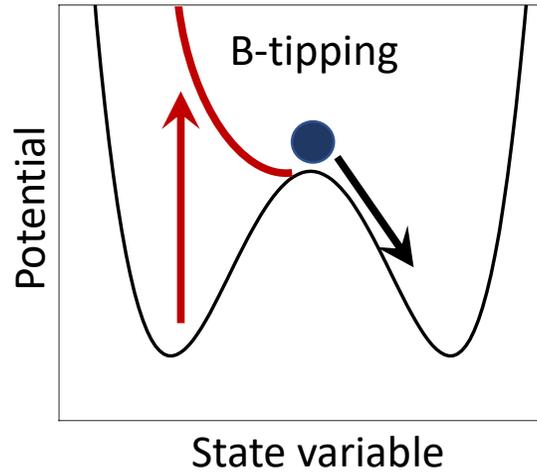


[Photo: IISD, Canada]

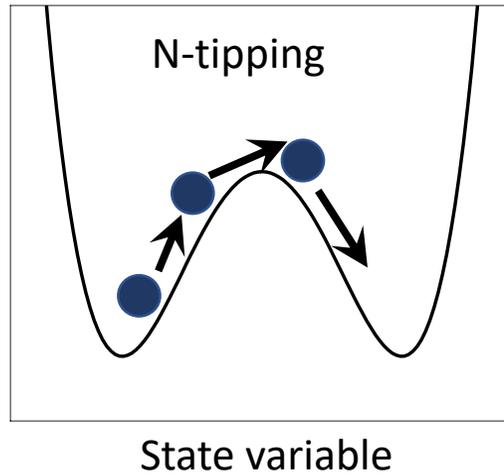
Lacs peu profonds :
seuil critique dans la
concentration de nutriments

Mécanismes de bascule

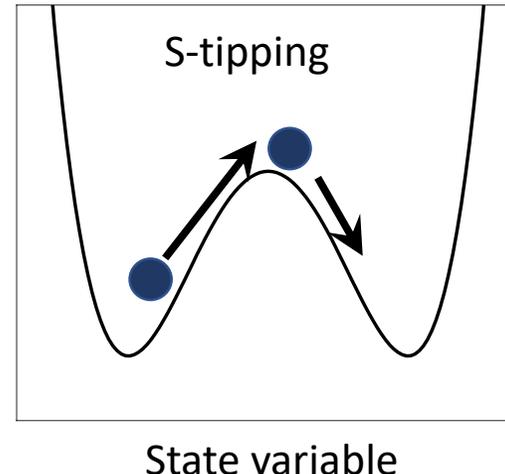
Bifurcation-induced tipping



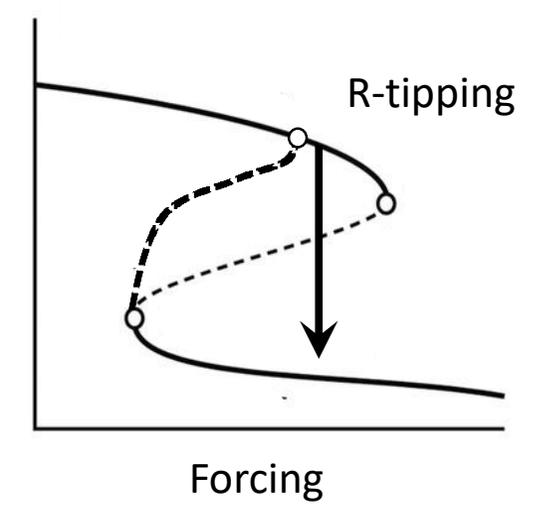
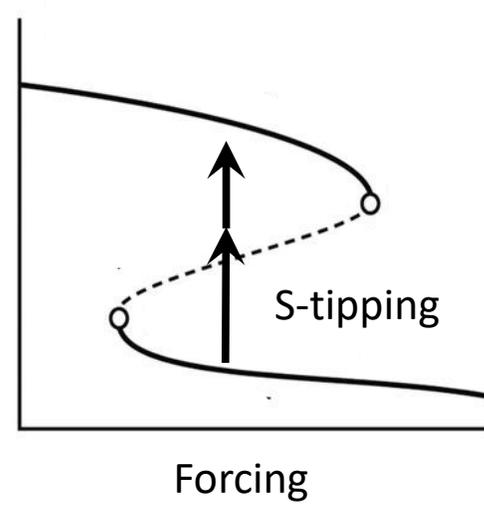
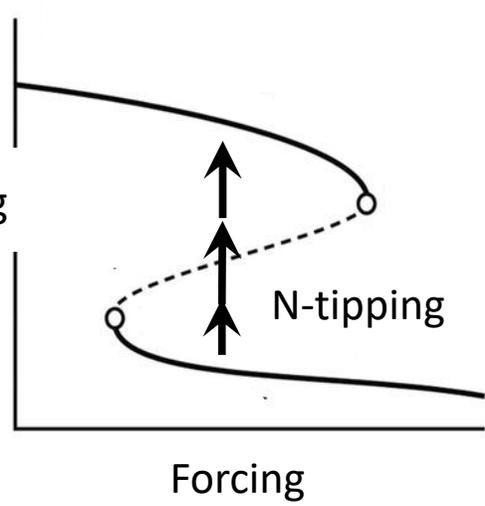
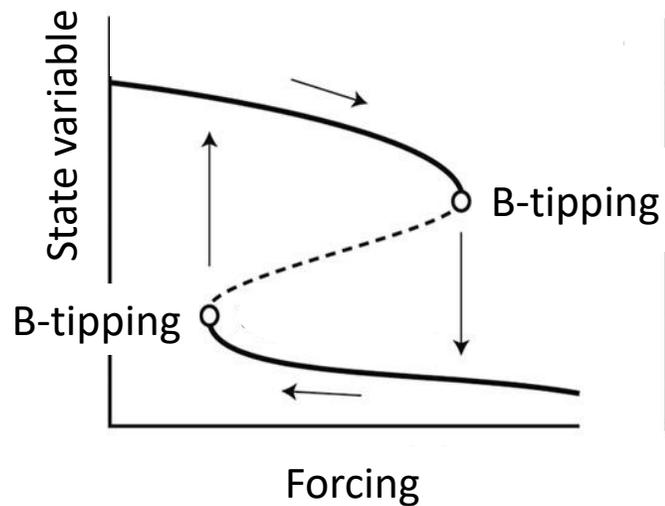
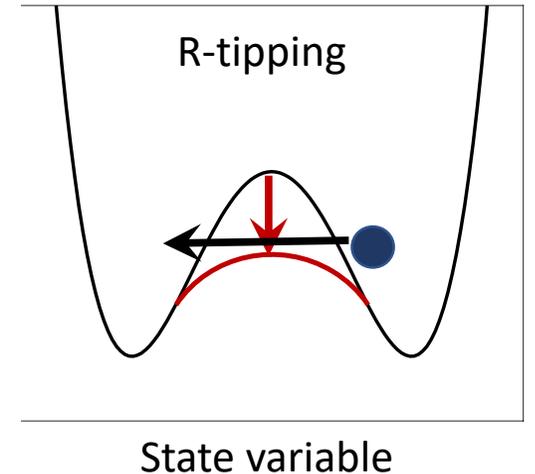
Noise-induced tipping



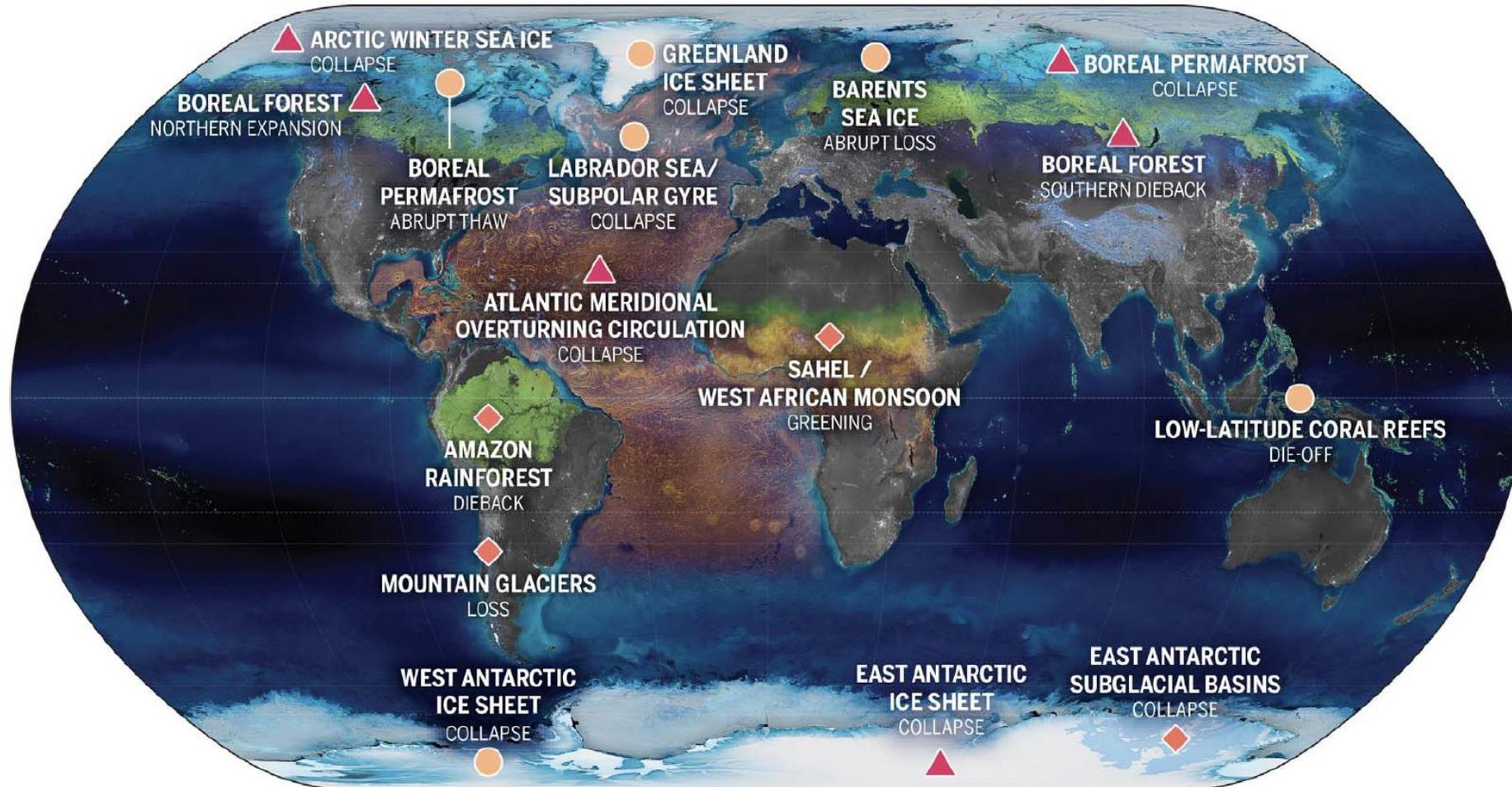
Shock-induced tipping



Rate-induced tipping



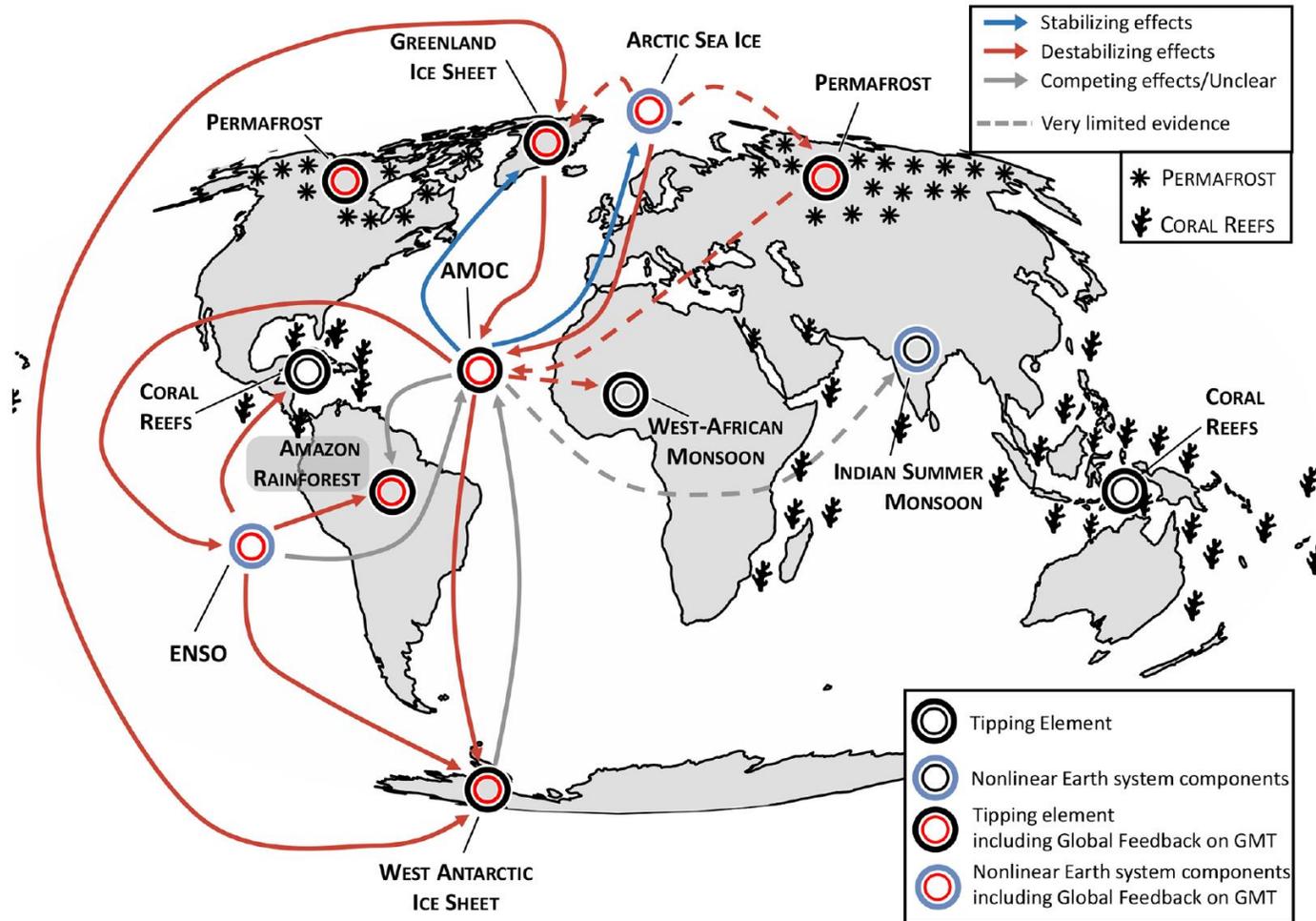
Points de bascule dans le système climatique



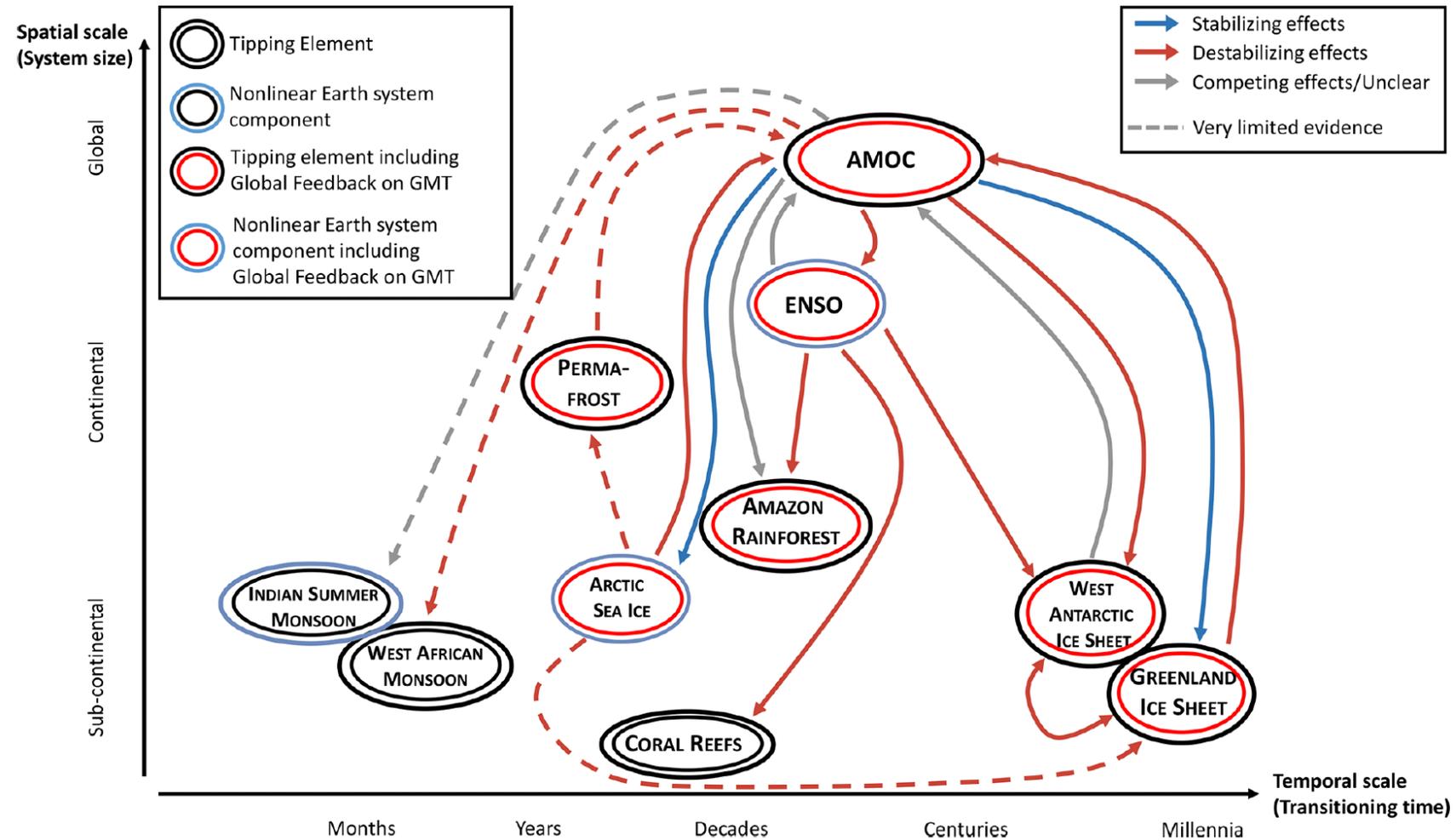
GLOBAL WARMING THRESHOLDS

● <2°C ◆ 2-4°C ▲ ≥4°C

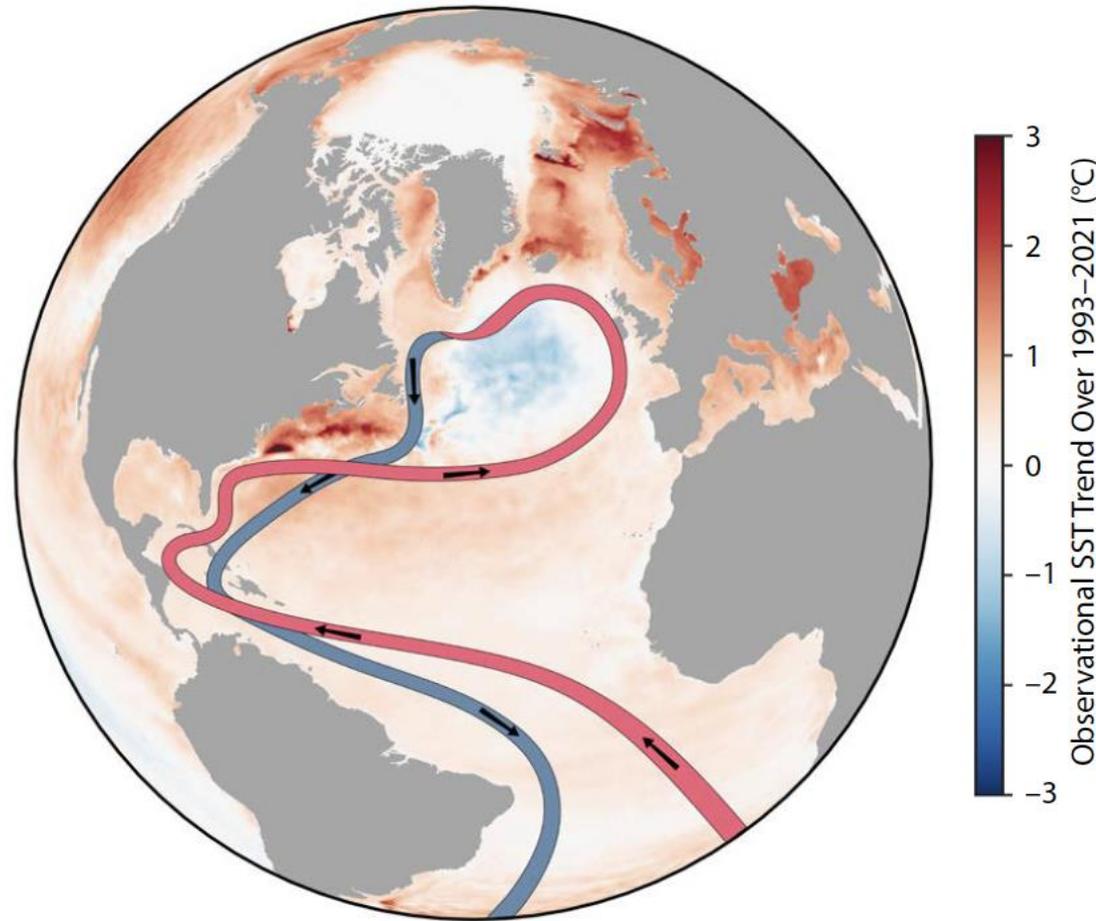
Points de bascule dans le système climatique: interactions



Echelles spatiales et temporelles

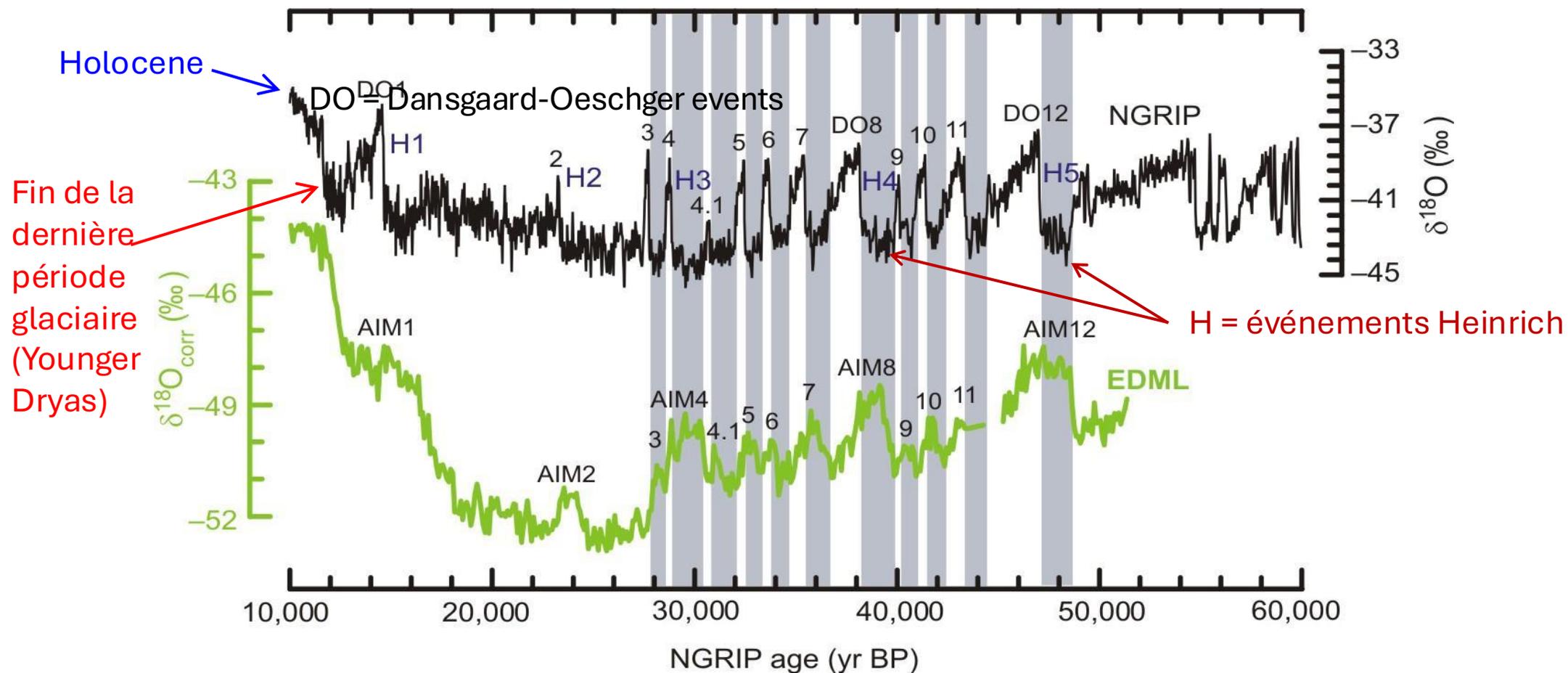


Atlantic Meridional Overturning circulation (AMOC)



Sea surface temperature trend since 1993 from the Copernicus Climate Change Service
(Image credit: Ruijian Gou)

Changements rapides enregistrés dans les carottes de glace polaires



Événements DO (phase de réchauffement rapide dans l'hémisphère Nord) : intrusion vers le nord d'eaux chaudes de l'Atlantique dans la région polaire (5 à 10 °C en quelques décennies)

Phase de plateau : 'mode chaud' de la circulation océanique atlantique, qui s'affaiblit progressivement sur plusieurs siècles

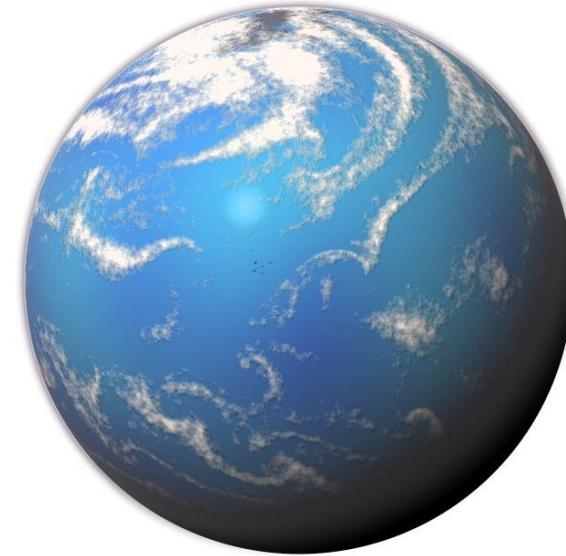
Événements Heinrich (phase finale de refroidissement) : effondrement de l'AMOC, fin de la formation d'eaux profondes

Simulations climatiques

MITgcm, resolution : 2.8°

Échelle temporelle : milliers d'années

Planète-océan:
couplage nonlinéaire entre
océan, atmosphère et banquise



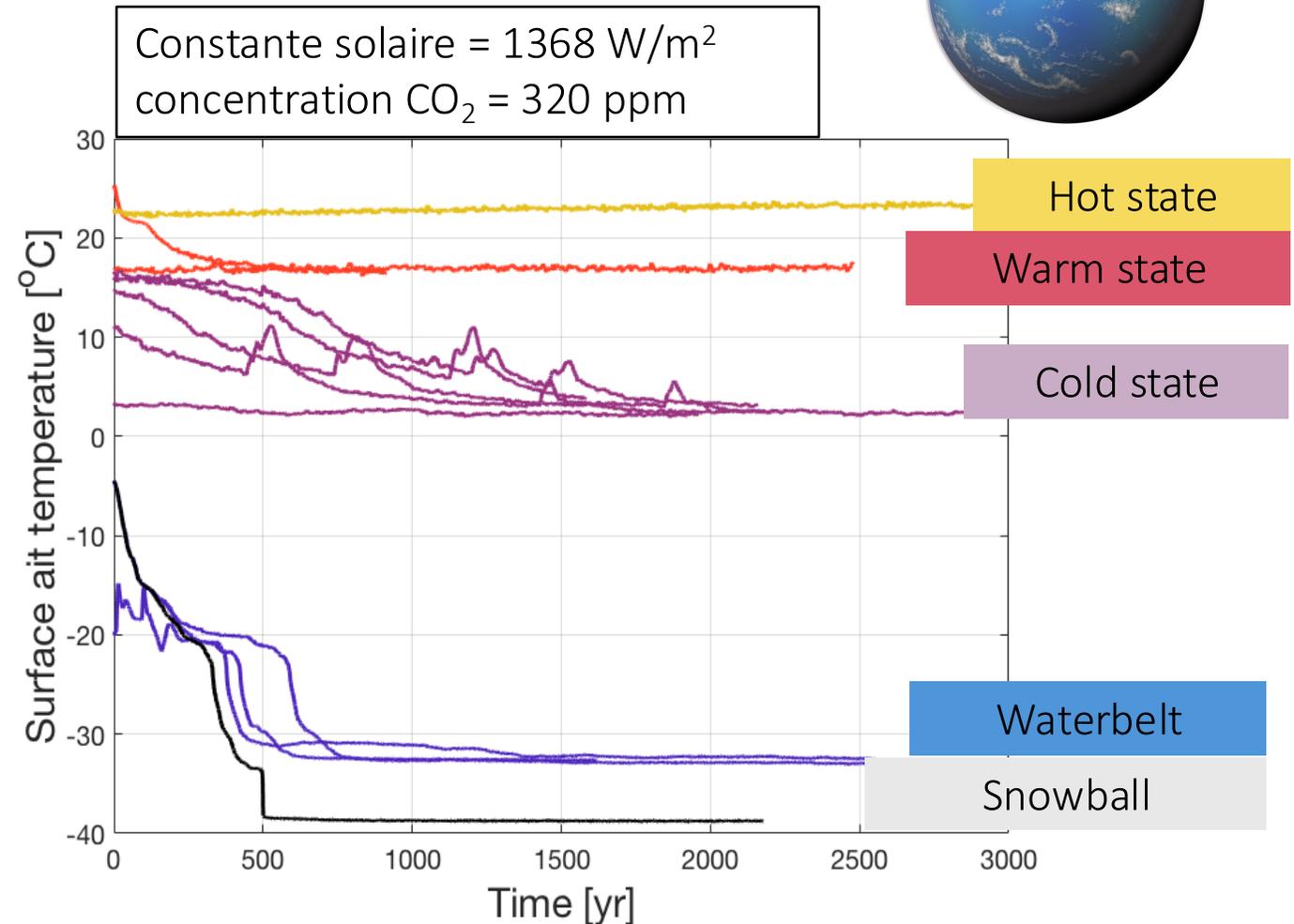
Simulations climatiques

Planète-océan



MITgcm, résolution : 2.8°

Cinq attracteurs climatiques selon les conditions initiales pour le même forçage



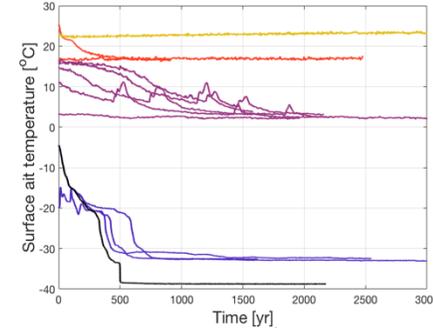
Simulations climatiques

Diagramme de bifurcation

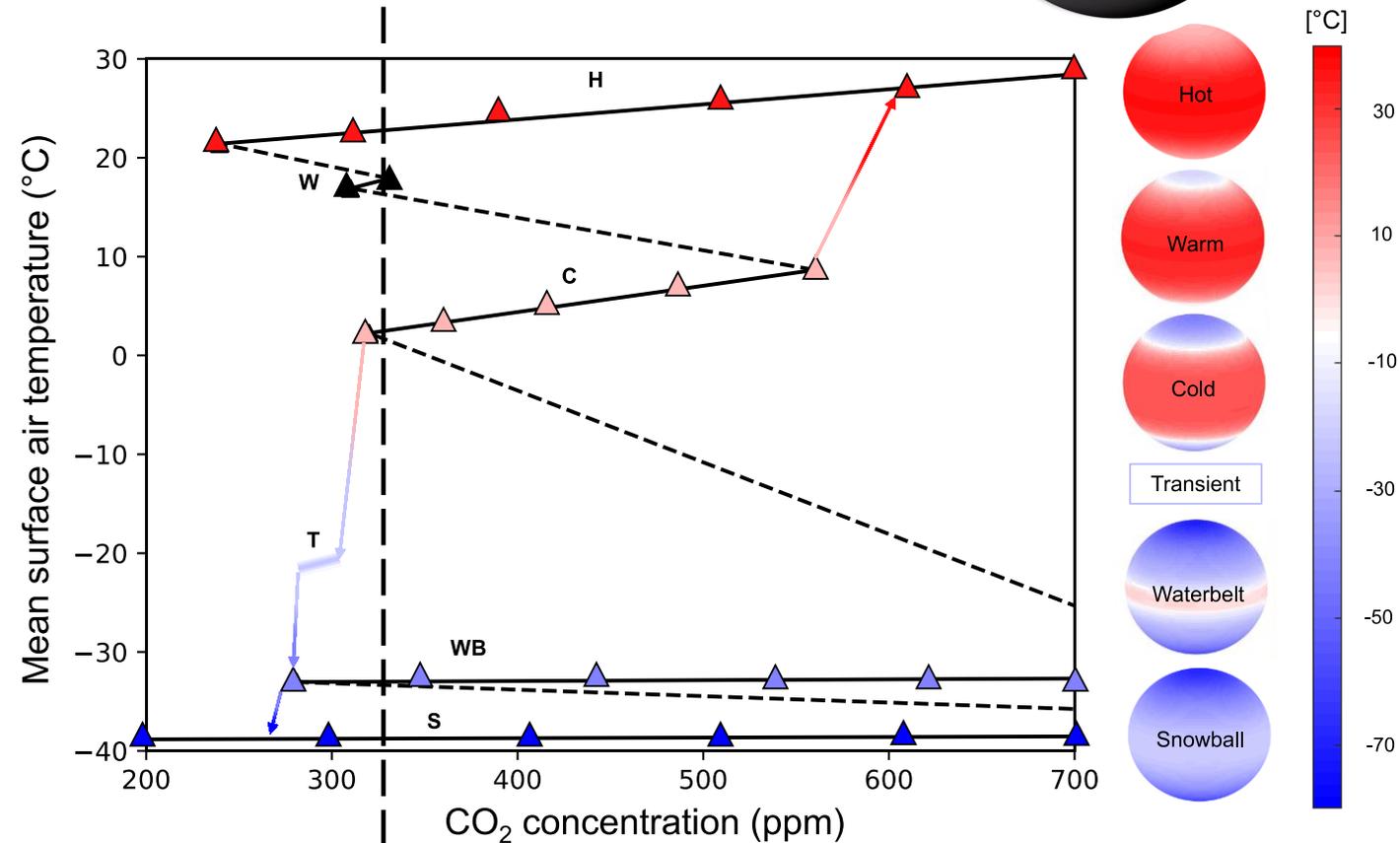
Multistabilité dans le système climatique

Structure dynamique complexe

Attracteurs sont des objets de dimension élevée



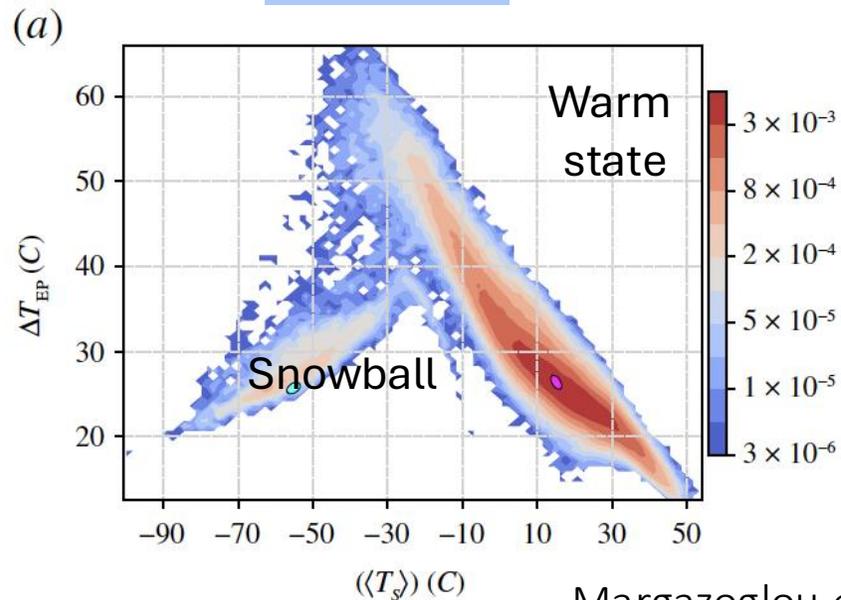
Planète-océan



Attracteur... c'est quoi exactement ?

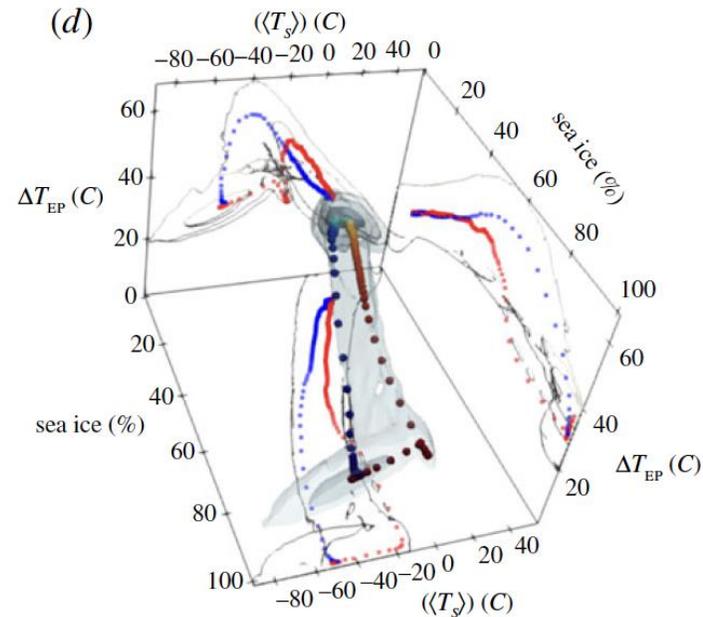
Objet de dimension élevée

2 variables



Margazoglou *et al.*, Proc. R. Soc. A (2021)

3 variables



Faranda *et al.*, Tellus (2018)

Lucarini & Bódai, PRL (2019)

Falasca & Bracco, Phys. Rev. X (2022)

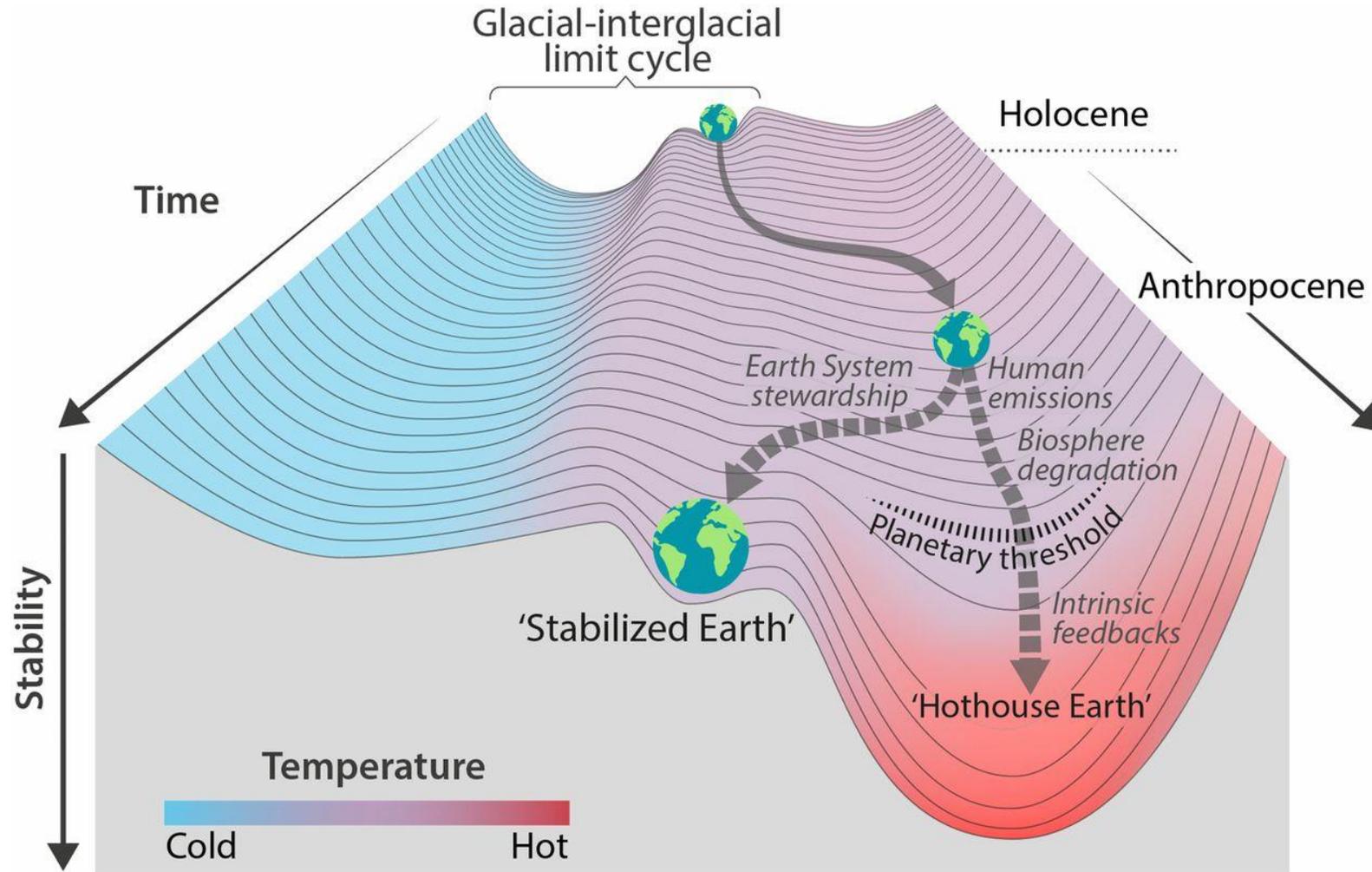
Ghil & Sciamarella, Nonlin. Proc. Geophys. (2023)

Moinat *et al.*, Chaos (2024)

Millán *et al.*, Nature Phys. (2024)

Des concepts issus de la mécanique statistique, de la théorie des systèmes dynamiques, de la topologie, des réseaux... sont nécessaires pour le définir

Une représentation de l'évolution du climat



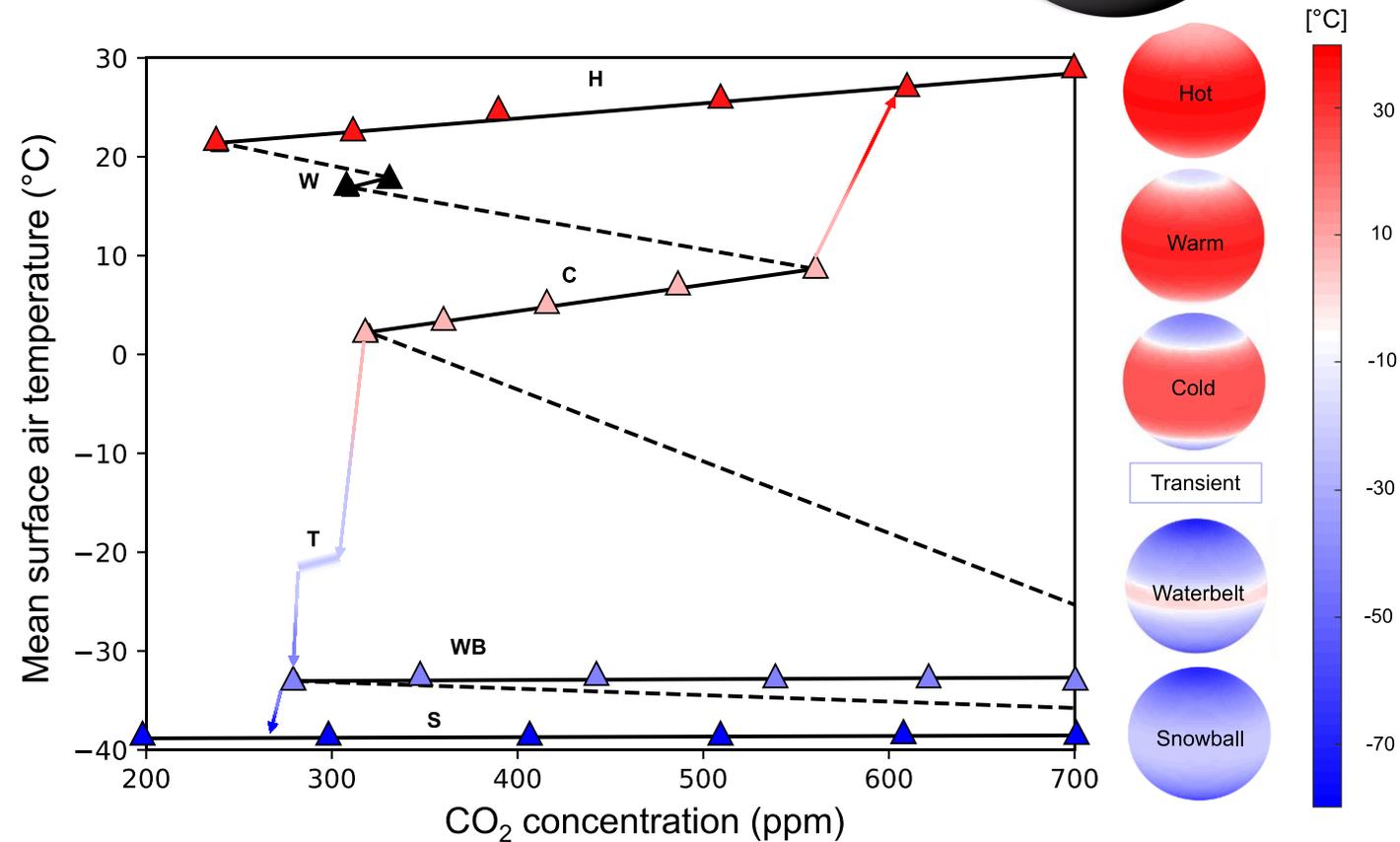
Simulations climatiques

Coupled aquaplanet



Diagramme de bifurcation

- Points de bascule à l'échelle globale
- Réseaux appliqués aux transitions:
 - Cold → Hot
 - Cold → Snowball



Moinat *et al.* Chaos 2024

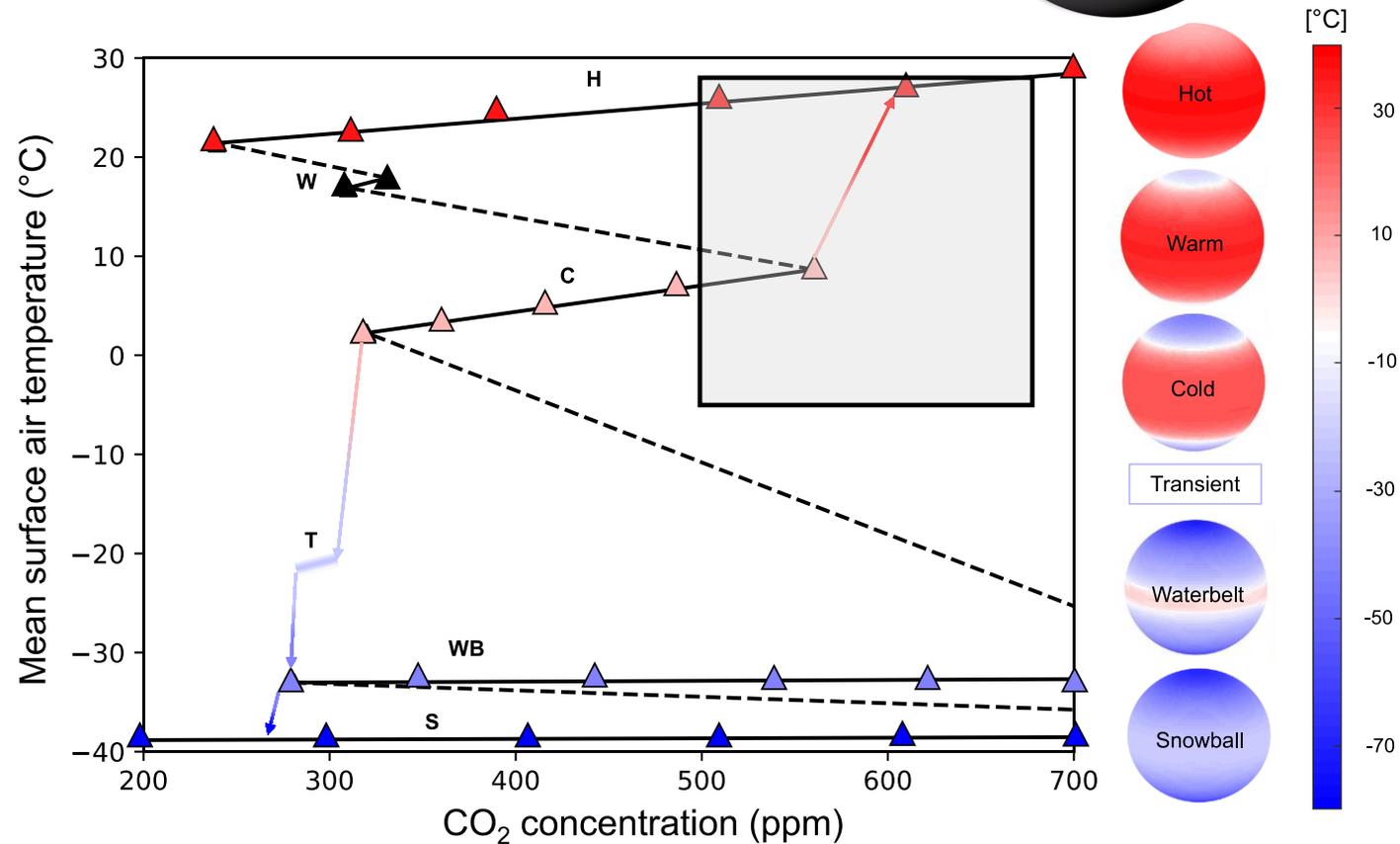
Simulations climatiques

Coupled aquaplanet



Diagramme de bifurcation

- Points de bascule à l'échelle globale
- Réseaux appliqués aux transitions:

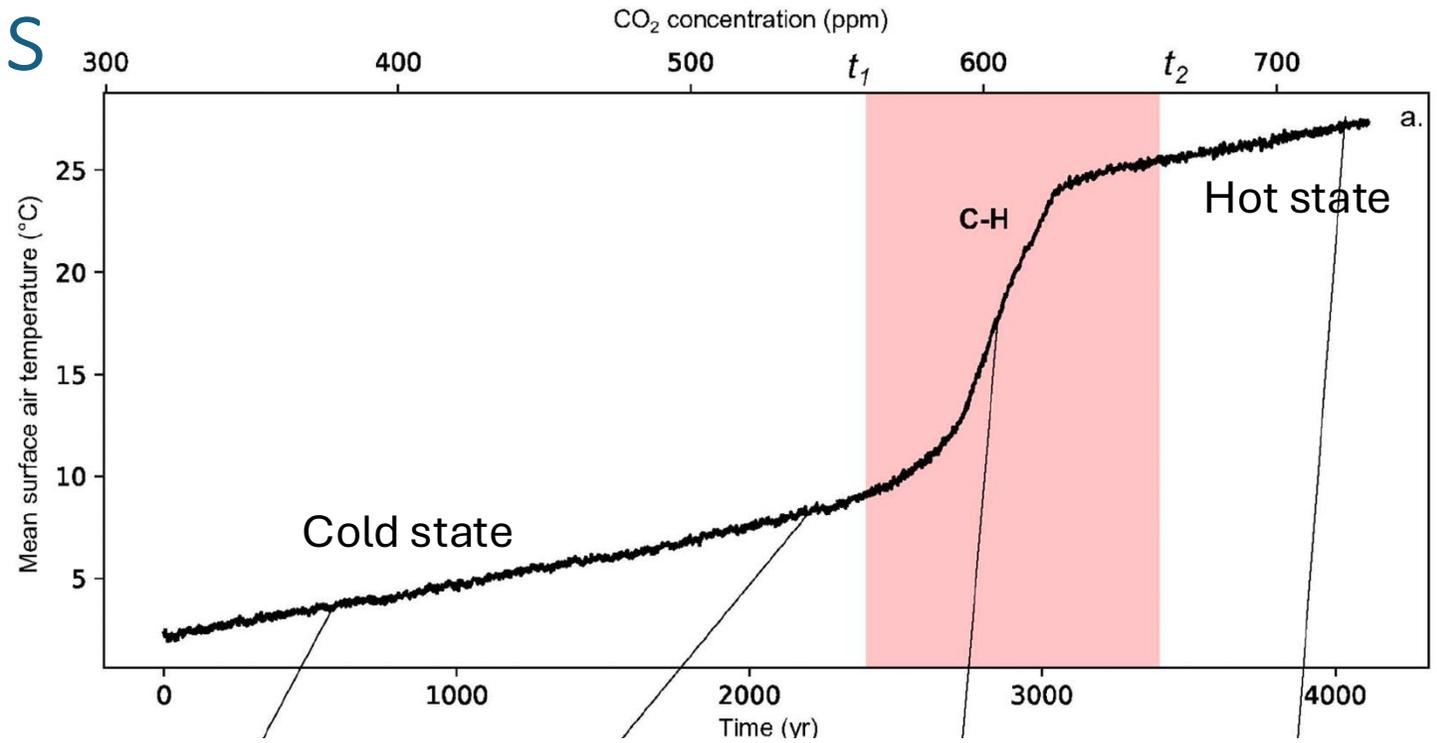
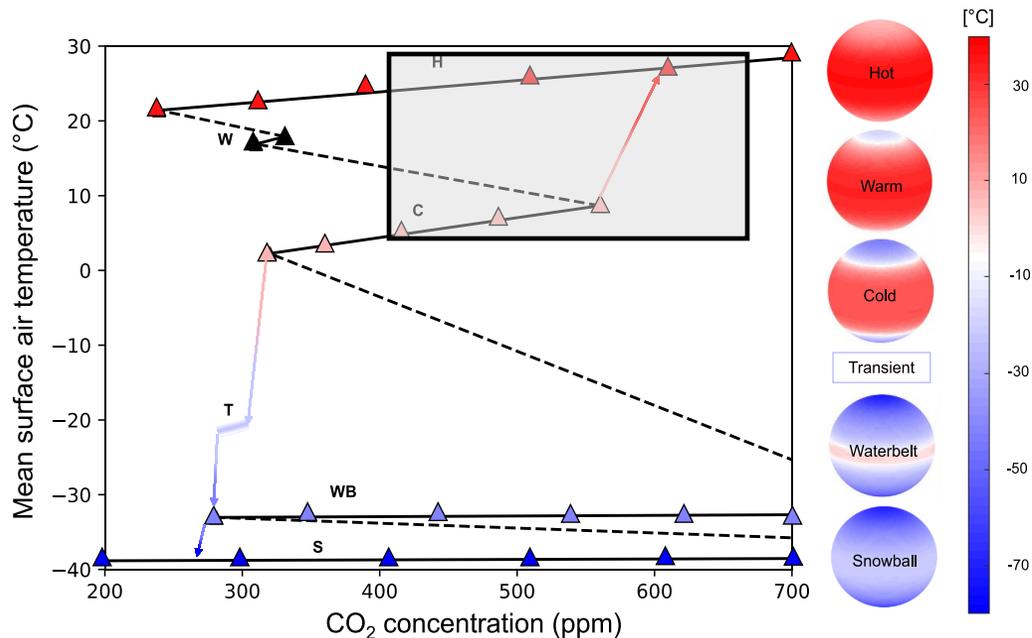


Moinat *et al.* Chaos 2024

Simulations climatiques

Cold → Hot

- Augmentation de CO₂ : 0.1 ppm/year



Phase de tipping:

- Changement de la pente dans l'évolution de la température
- Échanges d'énergie entre océan/atm/banquise

(Brunetti & Ragon PRE 2023)

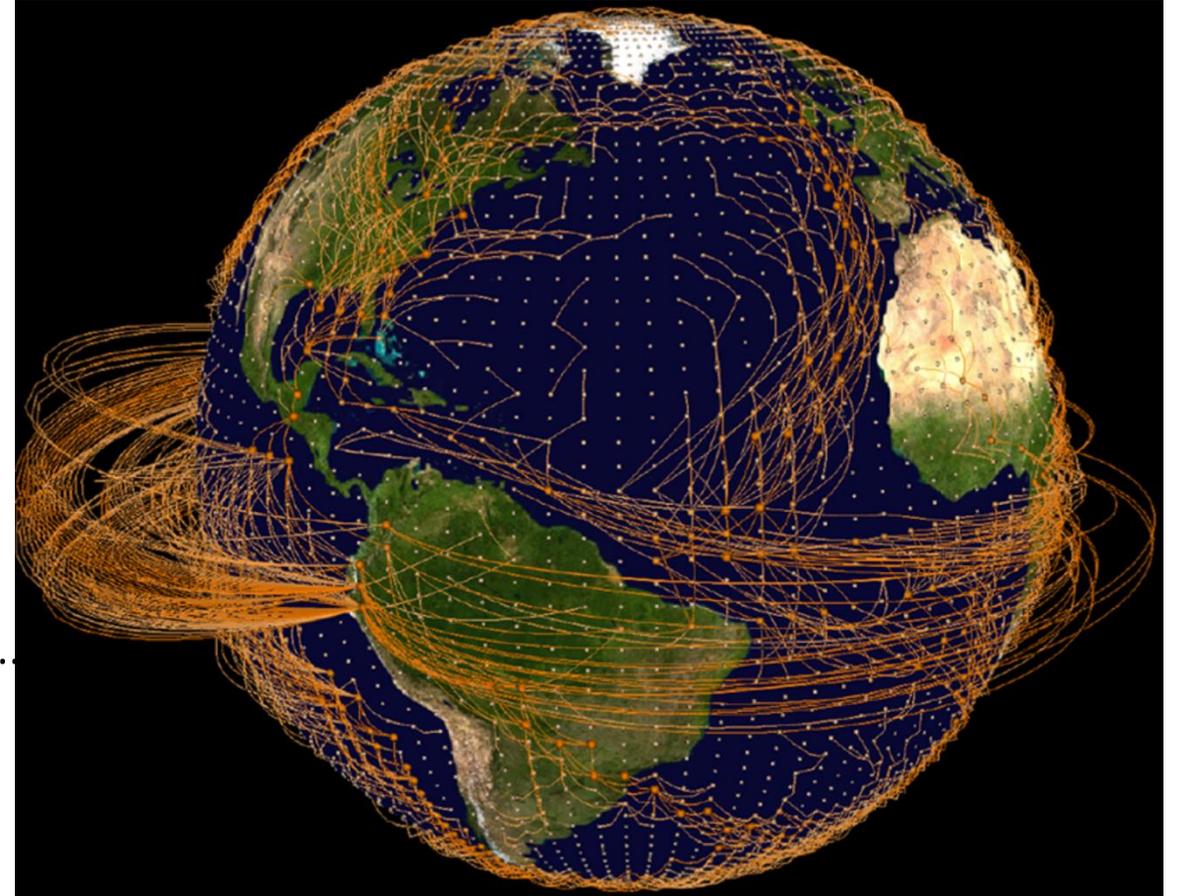
Reseaux climatiques: motivation

Comprendre les processus de bascule dans le système climatique

Une information spatiale ET temporelle est nécessaire pour identifier la *région de départ* et le *développement* d'une transition: corrélations spatiales maximales au seuil critique

Reseaux complexes: applications réussies dans les systèmes biologiques, sociaux, technologiques.

(Dijkstra et al. Networks in Climate, CUP 2019)



(Nocke et al. Nonlin. Proc. Geophys. 2015)

Reseaux climatiques: motivation

Comprendre les processus de bascule dans le système climatique

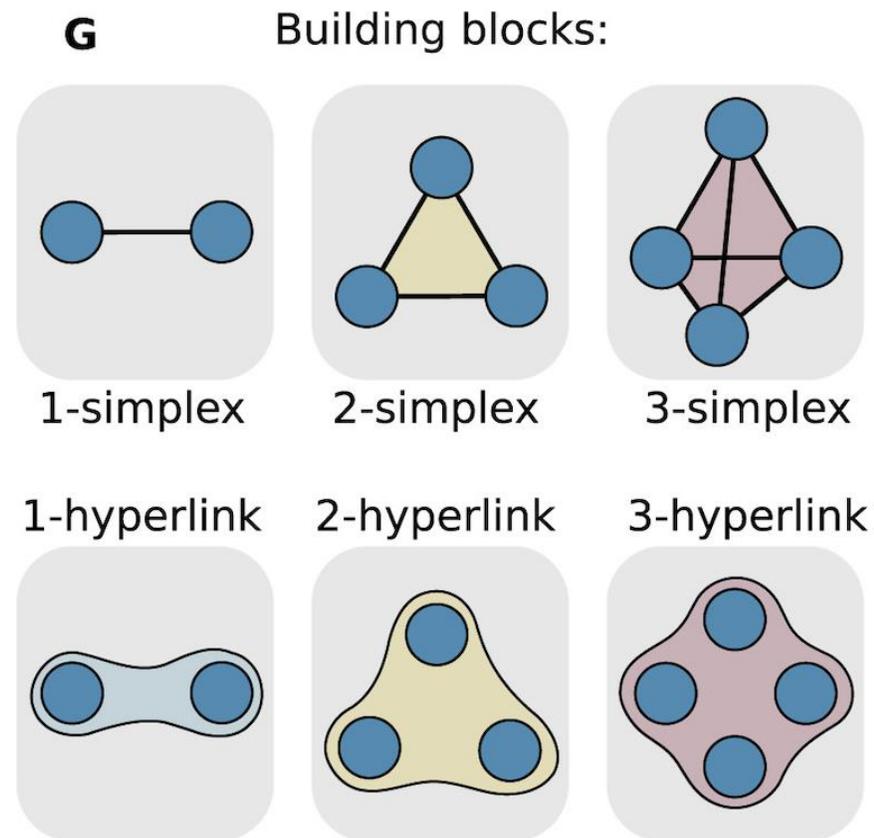
Une information spatiale ET temporelle est nécessaire pour identifier la *région de départ* et le *développement* d'une transition: corrélations spatiales maximales au seuil critique

Reseaux complexes: applications réussies dans les systèmes biologiques, sociaux, technologiques...

(Dijkstra et al. Networks in Climate, CUP 2019)

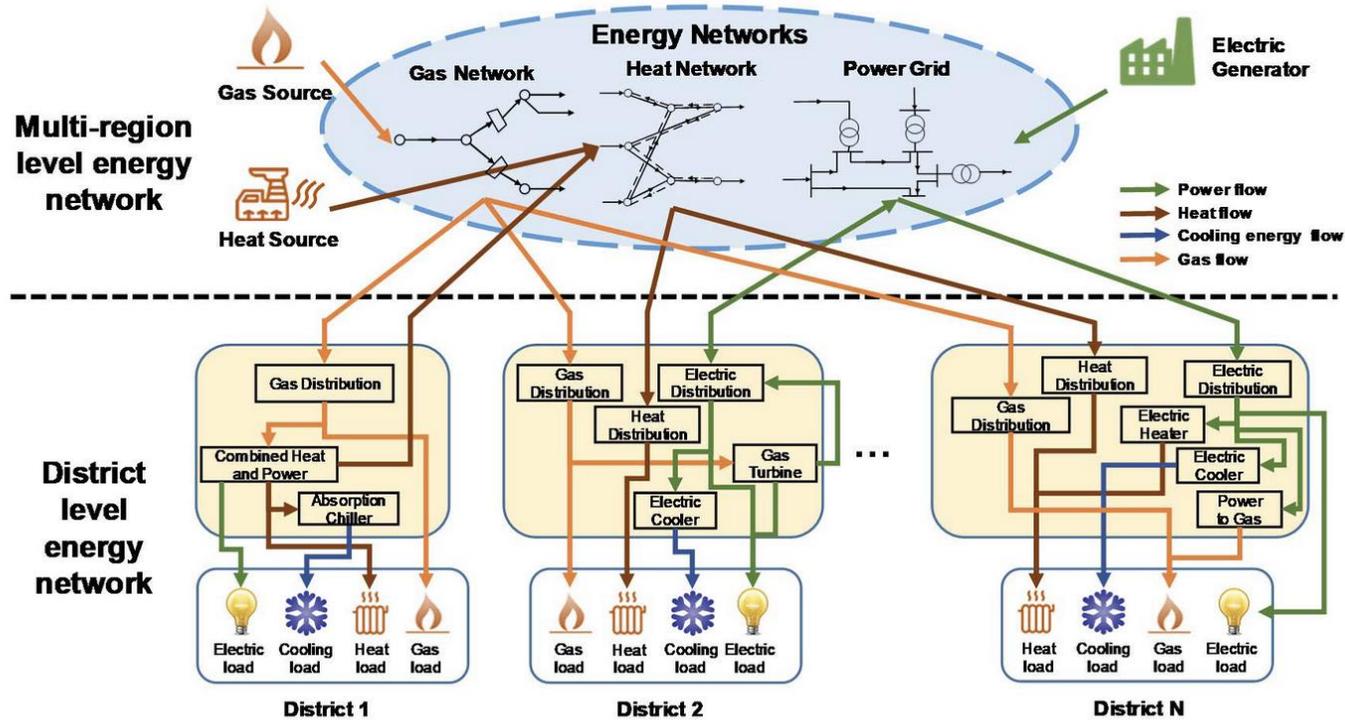
TOPOLOGIE & DYNAMIQUE

(Millán et al. Nat. Phys. 2025)



(Battiston et al. Phys Rep. 2020)

Autres exemples de reseaux



Zhang & Iliceto, CIGRE 2021

Sciences sociales



Construction des reseaux climatiques

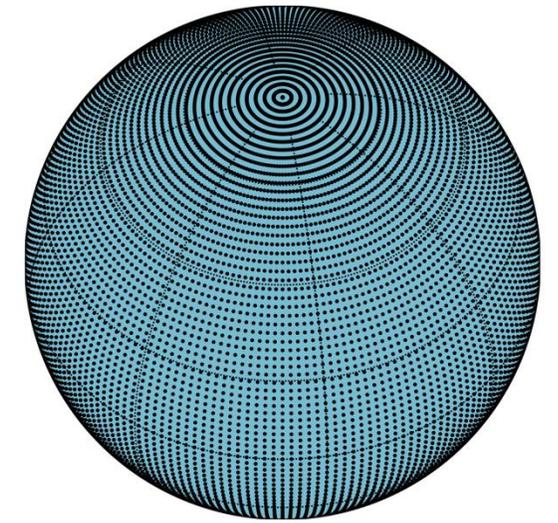
→ Nœuds/sommets = séries temporelles d'une variable climatique

Température de l'air de surface

Couverture nuageuse

Humidité spécifique

Moinat *et al.* Chaos 2024



Points de la grille
numérique = sommets

Construction des reseaux climatiques

Noeuds/sommets = séries temporelles d'une variable climatique
Température de l'air de surface

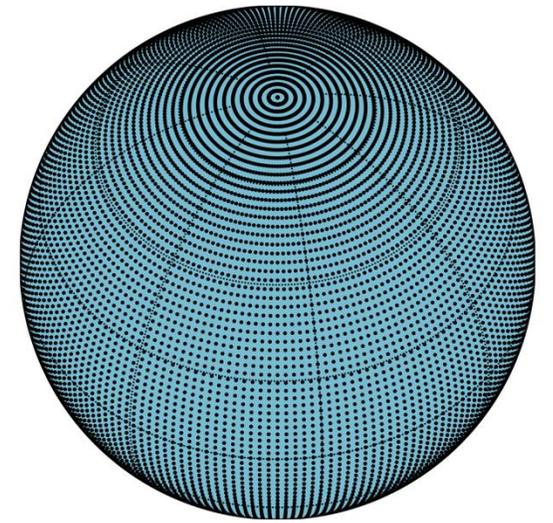
→ Liens entre les sommets = arêtes

Correlations linéaires : coefficient de corrélation de Pearson

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Correlations nonlinéaires : information mutuelle

$$MI_{X,Y} = \sum_X \sum_Y p(x,y) \log \frac{p(x,y)}{p(x)p(y)}$$



Points de la grille
numérique = sommets

Mesures symétriques :
aucune information sur
la direction des interrelations !

(Python package: *pyUnicorn*, Donges et al. Chaos 2015)

Construction des reseaux climatiques

Nœuds/sommets = séries temporelles d'une variable climatique
Température de l'air de surface

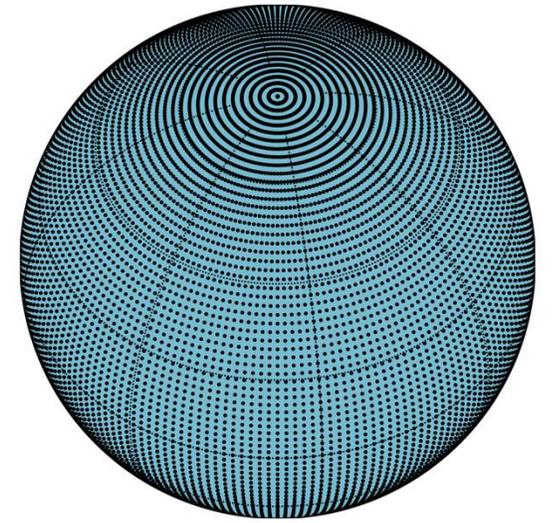
Liens entre les sommets = arêtes

Correlations linéaires : Coefficient de corrélation de Pearson

Correlations nonlinéaires : information mutuelle

→ Mesures avec directionnalité et causalité :

directionality index, Granger causality, ordinal analysis,
Liang–Kleeman information flow,
Peter and Clark momentary conditional independence...

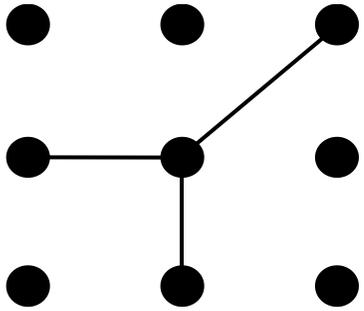


Mesures symétriques :
aucune information sur
la direction des interrelations !

Tirabassi et al. Chaos (2017)
Dijkstra et al. Networks in Climate, CUP 2019
Runge et al. Sci. Adv. (2019)
Nowack et al. Nat. Comm. (2020)
Docquier et al. Nonlin. Proc. Geo. (2024)...

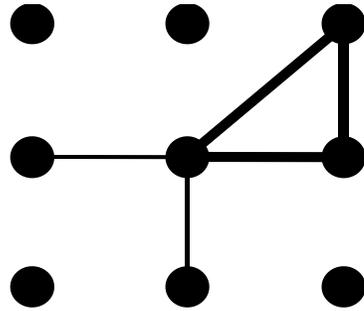
Indicateurs de réseau

Normalized degree centrality



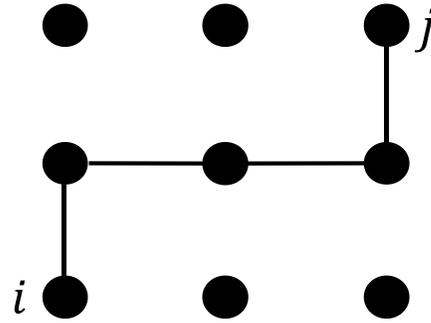
$$ND = \frac{\sum \text{edges}}{N}$$

Global clustering coefficient



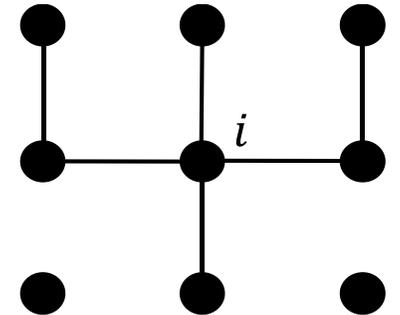
$$C = \frac{\sum \text{edges in the first neighbours}}{\text{Number of first neighbours}}$$

Average path length



$$L = \frac{1}{\binom{N}{2}} \sum_{i < j} d_{ij}$$

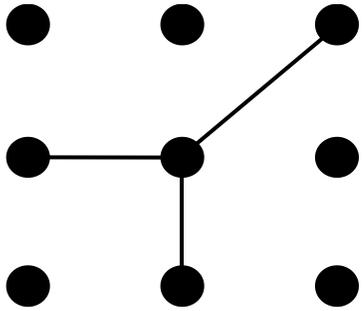
Betweenness centrality



$$B_i = \sum_{jk \neq i} \frac{\sigma_{jk}(i)}{\sigma_{jk}}$$

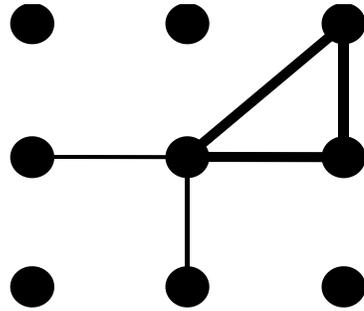
Indicateurs de réseau

Normalized degree centrality



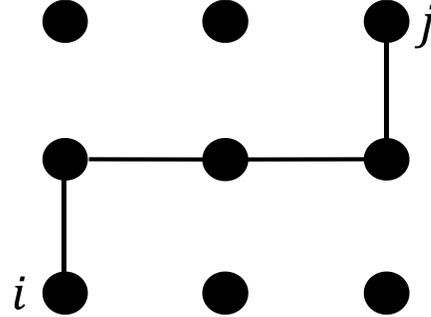
$$ND = \frac{\sum \text{edges}}{N}$$

Global clustering coefficient



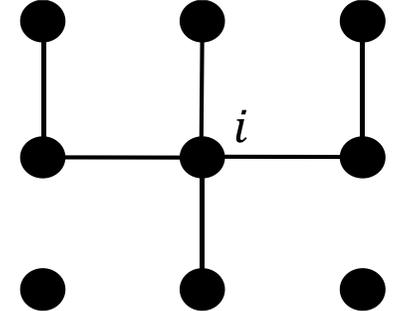
$$C = \frac{\sum \text{edges in the first neighbours}}{\text{Number of first neighbours}}$$

Average path length



$$L = \frac{1}{\binom{N}{2}} \sum_{i < j} d_{ij}$$

Betweenness centrality



$$B_i = \sum_{j,k \neq i} \frac{\sigma_{jk}(i)}{\sigma_{jk}}$$

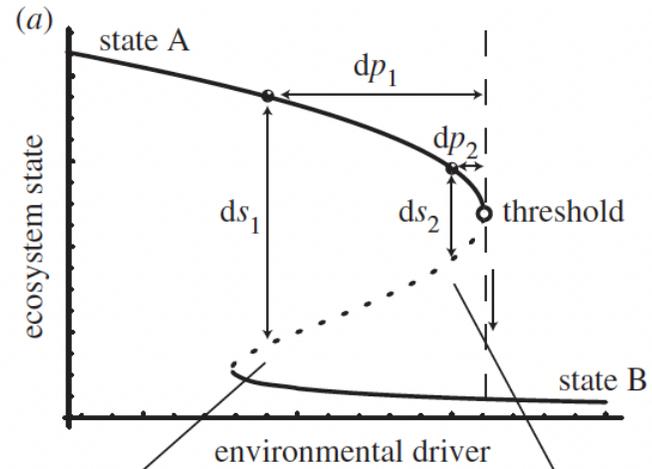
Local

Mesoscopic

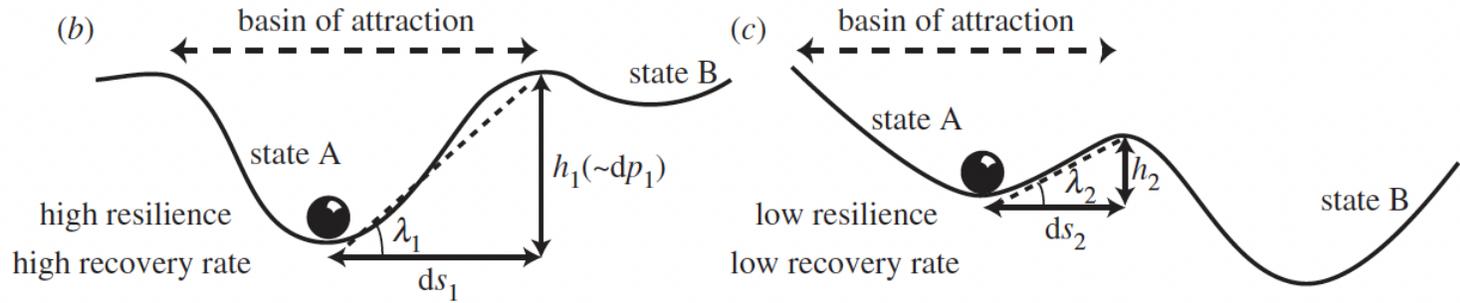
Global

Différentes échelles topologiques de l'information

Indicateurs traditionnels

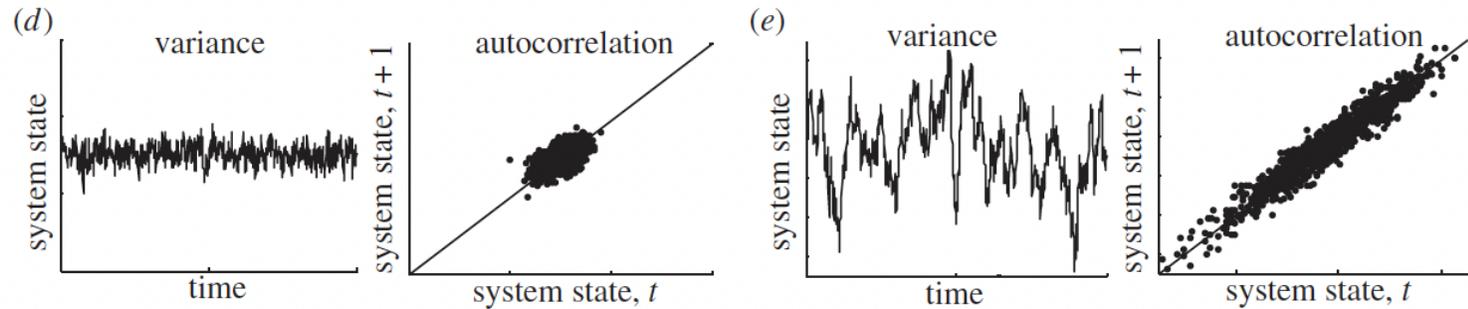


Resilience



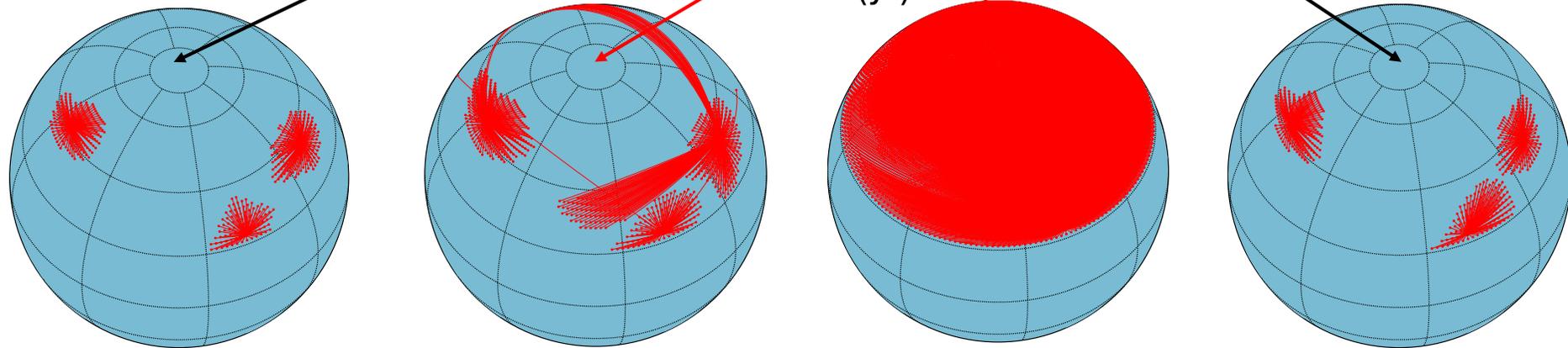
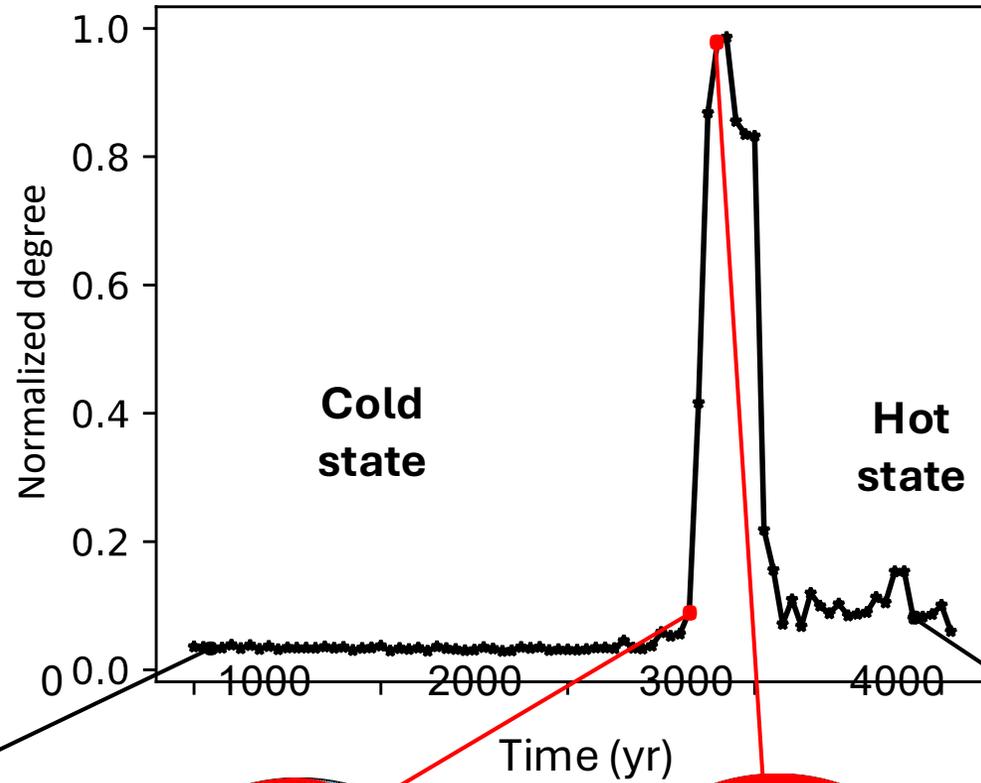
Variance

Autocorrelation



Comportement du réseau pendant une phase de 'tipping'

Point de bascule
=
correlation maximale

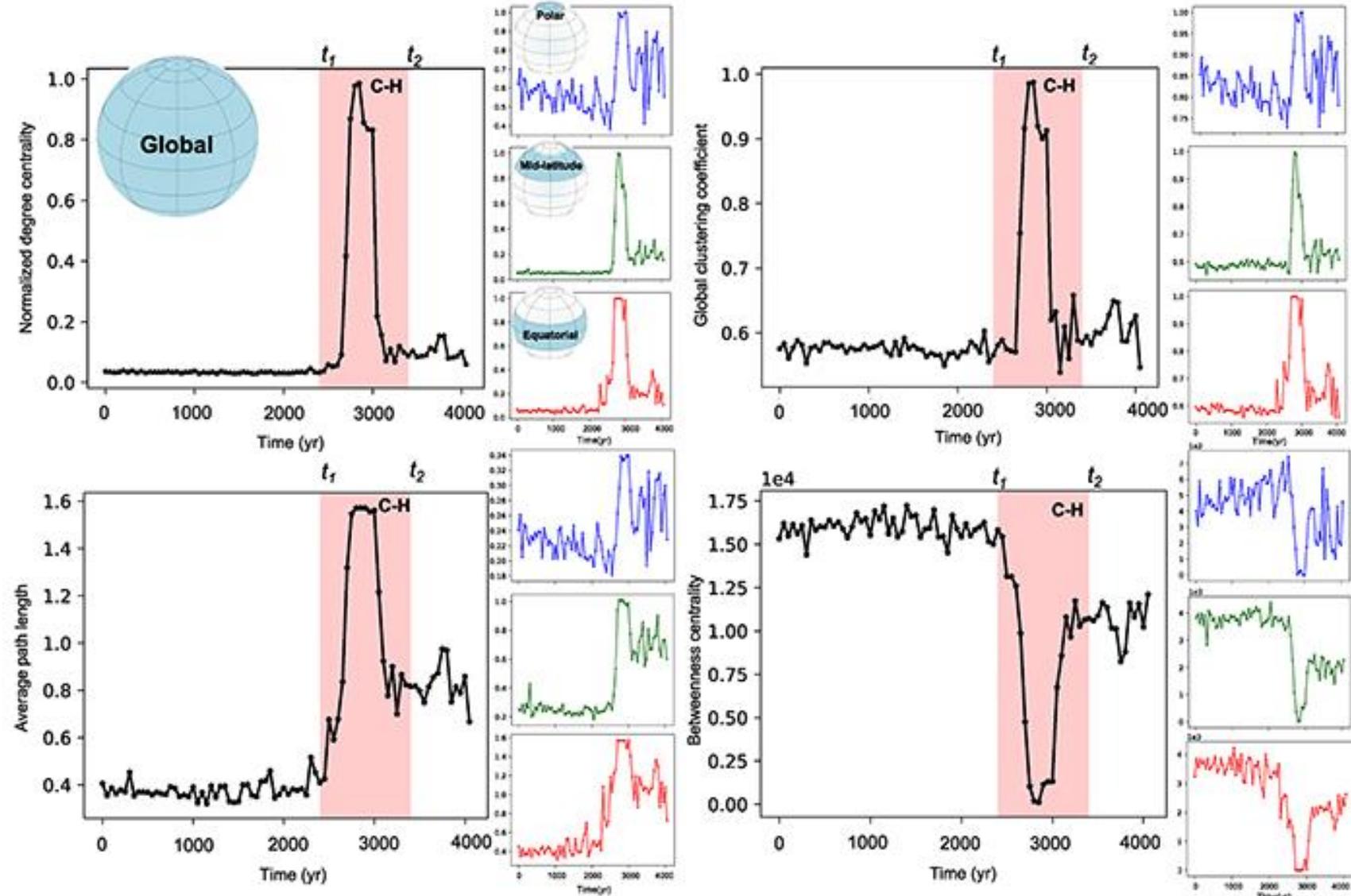


Comportement global vs régional

Signal fort à l'échelle globale

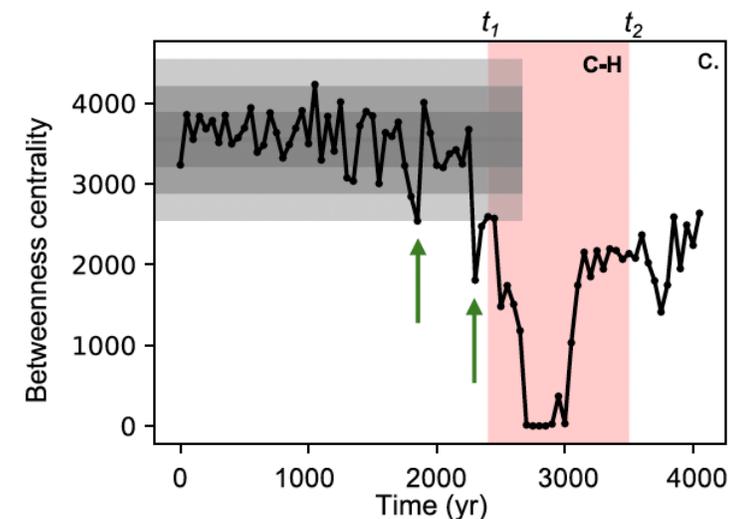
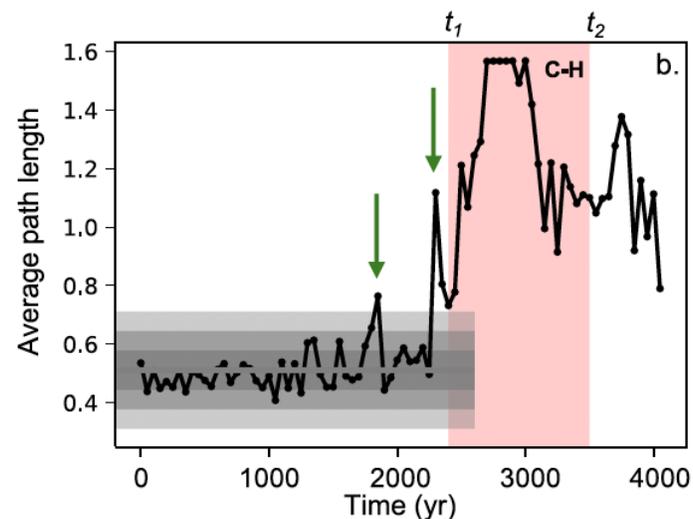
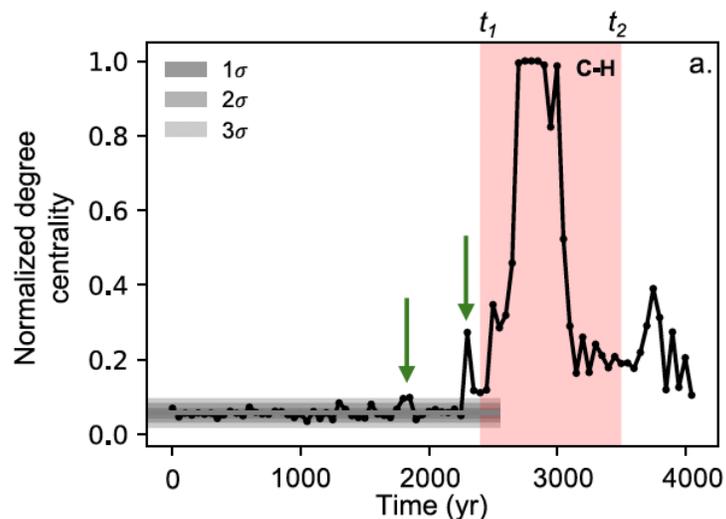
Réseaux régionaux montrent la phase de 'tipping' plus tôt

Signal d'alerte précoce dans la région équatoriale

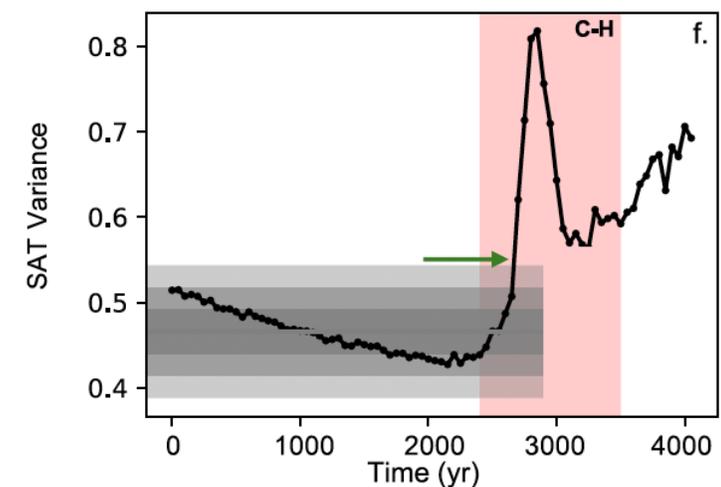
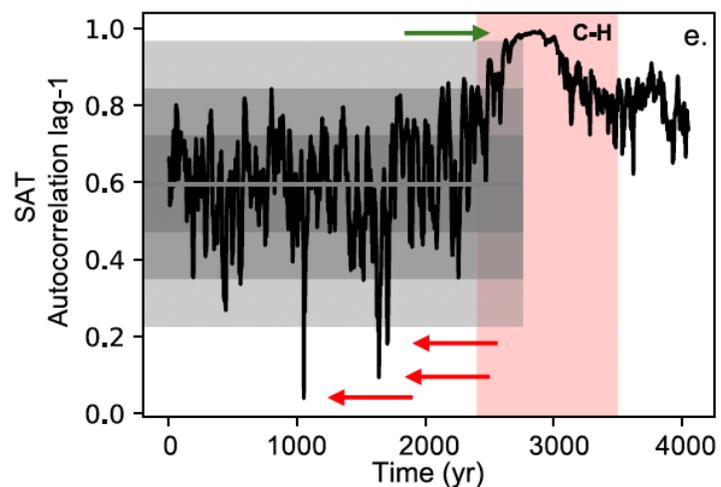
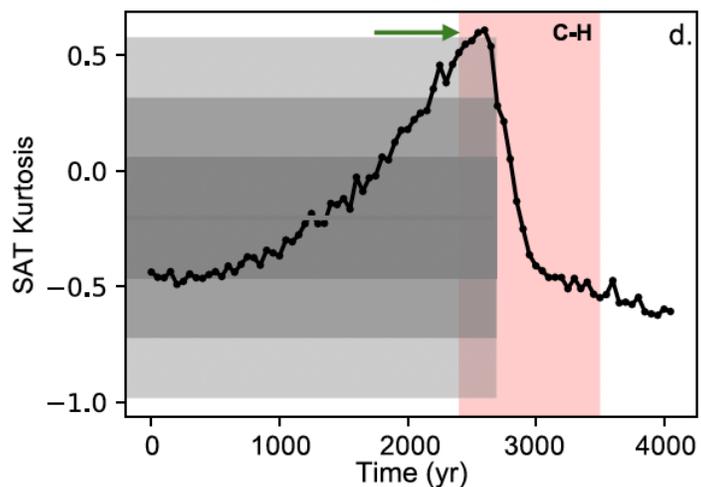


Signaux d'alerte précoce

Indicateurs
basé sur les
reseaux



Indicateurs
basé sur des
series
temporelles



Conclusion

- Les réseaux climatiques détectent le processus de 'tipping' et arrivent à localiser leur point de départ
- Information spatiale + temporelle pour obtenir de signaux d'alerte précoce
- Détection des régions où la dynamique devient non linéaire en utilisant des réseaux construits avec information mutuelle

Développements futurs

- Causalité
- Simulations du climat actuel
- Données d'observations satellitaires



Laure Moinat, Jérôme Kasparian, Maura Brunetti
Chaos 34, 123161 (2024)

תודה
Dankie Gracias
Спасибо شكراً
Merci Takk
Köszönjük Terima kasih
Grazie Dziękujemy Děkojame
Ďakujeme Vielen Dank Paldies
Kiitos Täname teid 谢谢
Thank You Tak
感謝您 Obrigado Teşekkür Ederiz
Σας Ευχαριστούμ 감사합니다
ขอบคุณ
Bedankt Děkujeme vám
ありがとうございます
Tack



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE



Schweizerischer Nationalfonds
Fonds national suisse
Fondo nazionale svizzero
Swiss National Science Foundation



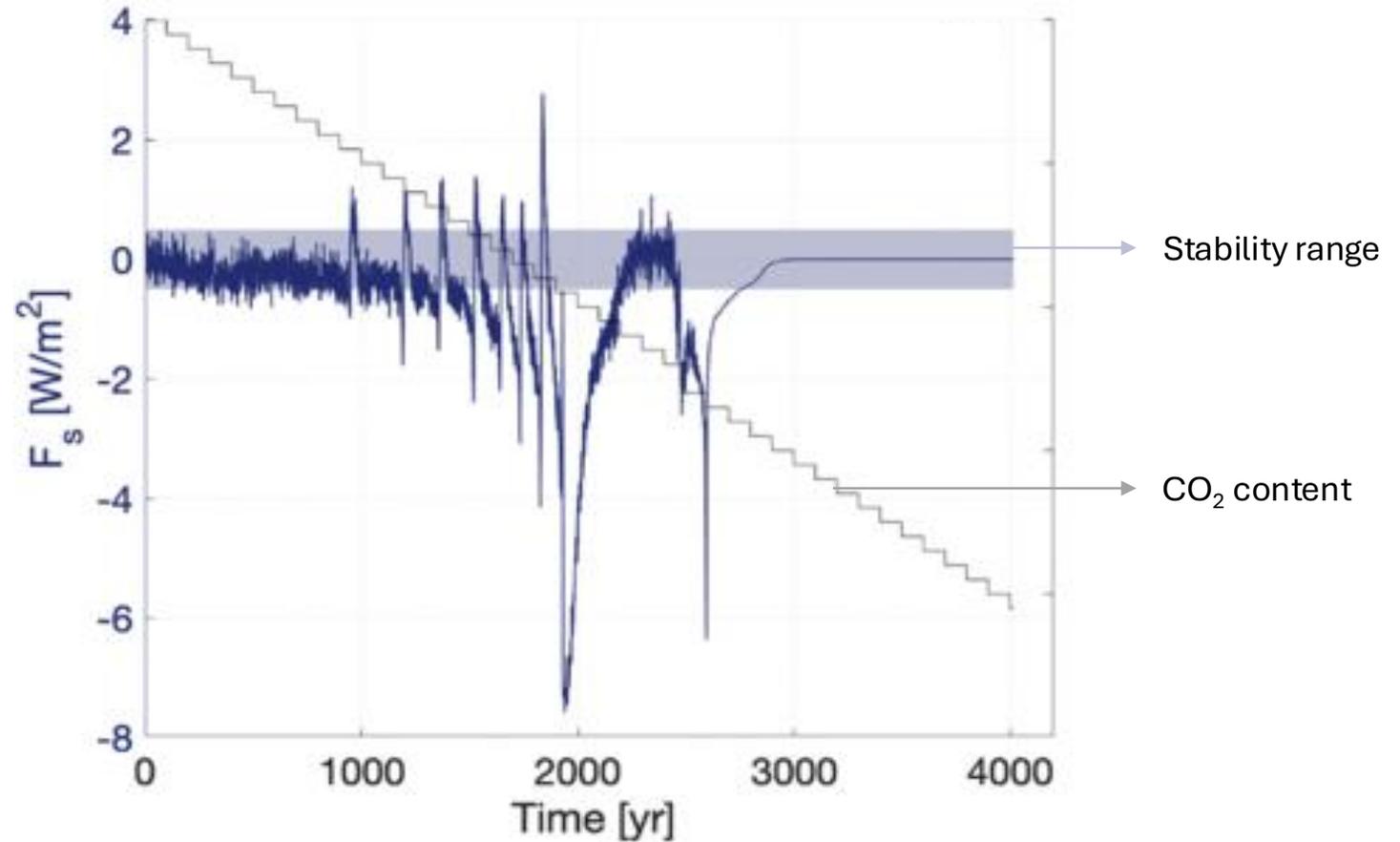
BIOGEO DYNAMICS



EUROPEAN COOPERATION
IN SCIENCE AND TECHNOLOGY

Cold → Snowball: Ocean surface imbalance

$$F_s(\phi, \lambda, t) = \underbrace{S_s^\downarrow - S_s^\uparrow}_{\text{Shortwave radiation}} + \underbrace{L_s^\downarrow - L_s^\uparrow}_{\text{Longwave radiation}} - \underbrace{H_S^\uparrow}_{\text{Sensible heat flux}} - \underbrace{H_L^\uparrow}_{\text{Latent heat}}$$



(Brunetti & Ragon PRE 2023)

Cold → Hot: non-linear dynamics

Linear (Pearson)

Non-linear + Linear (MI)

$$MI_{X,Y} = \sum_x \sum_y p(x, y) \log \left(\frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \right)$$

Non-linear (MI - PCC)

