

# Habilitation à diriger des recherches

---

## **Modélisation numérique du climat : de la théorie à la pratique**

David Saint-Martin

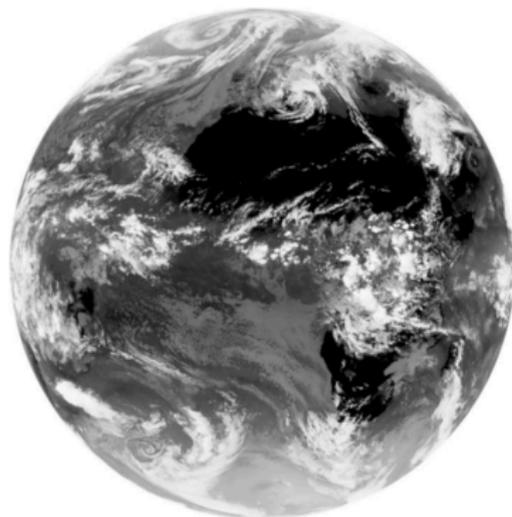
CNRM - Météo-France/CNRS - UMR 3589

13 octobre 2021

# Les mouvements du fluide atmosphérique

## Du réel...

- ▷ objet d'étude 'théorique' aux applications 'pratiques'
- ▷ couvrent une gamme d'échelles spatiales et temporelles considérable
- ▷ au cœur d'un système naturel complexe
- ▷ un système d'**observation** de plus en plus élaboré



Meteosat Second Generation (Bauer et al., 2021)

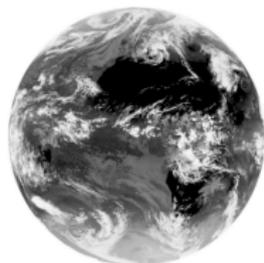
# Les mouvements du fluide atmosphérique

## Du réel...

- ▷ objet d'étude 'théorique' aux applications 'pratiques'
- ▷ couvrent une gamme d'échelles spatiales et temporelles considérable
- ▷ au cœur d'un système naturel complexe
- ▷ un système d'**observation** de plus en plus élaboré

## ...au modèle

- ▷ décrits (*modélisés*) par les lois de la physique
- ▷ dans un formalisme mathématique (équations aux dérivées partielles)



$$\frac{\partial}{\partial t} u_i + \sum_{j=1}^n u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \nu \Delta u_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i(x, t)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

# Les mouvements du fluide atmosphérique

## Du modèle...

- ▷ seulement une centaine de caractères...
- ▷ mais pas de solution analytique...

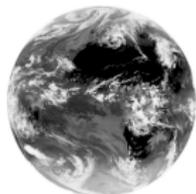
→ Des  $\partial$  aux  $\Delta$

- discrétisation des équations
- suite d'opérations élémentaires, traduites en langage informatique

## ...à la simulation numérique

- ▷ des millions de ligne de *code*...
- ▷ quelques milliers d'ordinateurs...
- ▷ et une solution approchée...

observation



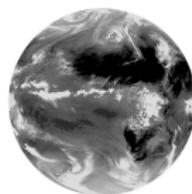
MSG (Bauer et al., 2021)

modélisation

$\partial \rightarrow \Delta$



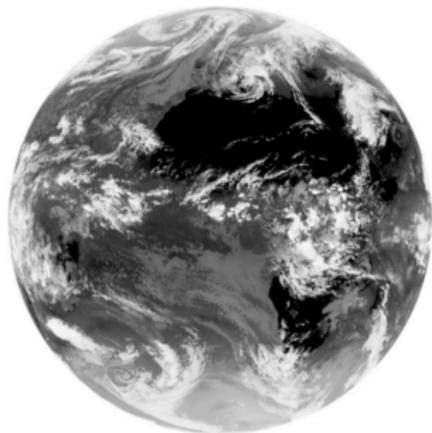
simulation



IFS @1 km (Bauer et al., 2021)

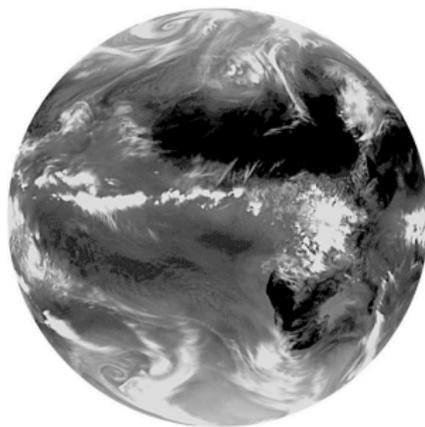
# La 'valeur' d'une simulation numérique

observation



MSG (Bauer et al., 2021)

simulation



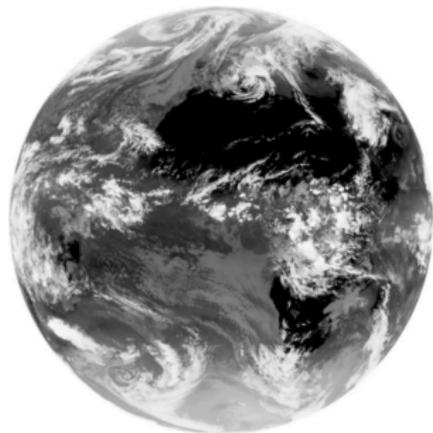
IFS @1 km (Bauer et al., 2021)

## Un outil de compréhension du réel si...

- ▷ *le modèle est bien simulé* (contenu du modèle, des hypothèses sous-jacentes, ...)
- ▷ *le simulé est bien compris* (limites du modèle, fidélité dans des cadres simplifiés, ...)
- ▷ *le réel est bien simulé* (fidélité de la simulation avec l'observation, ...)

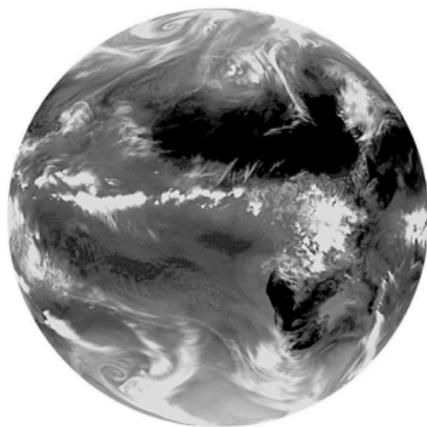
# La 'valeur' d'une simulation numérique

observation



MSG (Bauer et al., 2021)

simulation



IFS @1 km (Bauer et al., 2021)

## Un outil de compréhension du réel si...

- ▷ *le modèle est bien simulé* (contenu du modèle, des hypothèses sous-jacentes, ...)
- ▷ *le simulé est bien compris* (limites du modèle, fidélité dans des cadres simplifiés, ...)
- ▷ *le réel est bien simulé* (fidélité de la simulation avec l'observation, ...)

# La 'valeur ajoutée' d'une simulation numérique

## Le modèle

- ▷ la caractérisation de l'état du système à un instant  $t$ ,  $\mathbf{x}(t)$
- ▷ la définition de son évolution  $d\mathbf{x}/dt = F(\mathbf{x}; e; \Theta_i)$
- ▷ en fonction de données externes ( $e$ ) et de paramètres internes ( $\Theta_i$ )

## La simulation

- ▷ calcul des états ultérieurs du système ( $\mathbf{x}(t_1), \mathbf{x}(t_2), \dots$ ), connaissant l'état initial  $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$

## ▷ aller 'plus loin' dans le temps

Que se passera-t-il...

- ...suivant la valeur de la condition initiale?  $\partial\mathbf{x}/\partial\mathbf{x}_0$ ? → prévision numérique du temps
- ...si les  $e$  changent (de manière réaliste)?  $\partial\mathbf{x}/\partial e$  → projections climatiques

## ▷ aller 'plus loin' dans le réel

Que se passerait-t-il...

- ...si je modifiais (arbitrairement) les données d'entrée?  $\partial\mathbf{x}/\partial e$  → simulations 'idéalisées'
- ...si je modifiais telle ou telle composante du système?  $\partial\mathbf{x}/\partial\Theta_i$  → expériences numériques

# Du modèle atmosphérique au modèle climatique

## évolution sur de longues échelles de temps (typiquement plusieurs dizaines d'années)

- ▷ importance des conditions extérieures :  $t \rightarrow e(t)$
- ▷ rôle de différents acteurs (océan, surfaces continentales, ...) :  $\dim(\mathbf{x}) \nearrow, \dots$
- ▷ importance accrue des *paramétrisations* : discrétisation plus 'grossière',  $\dim(\Theta_i) \nearrow, \dots$
- ▷ phénomènes moins bien observés : sélection des  $\Theta_i$  plus délicate, ...

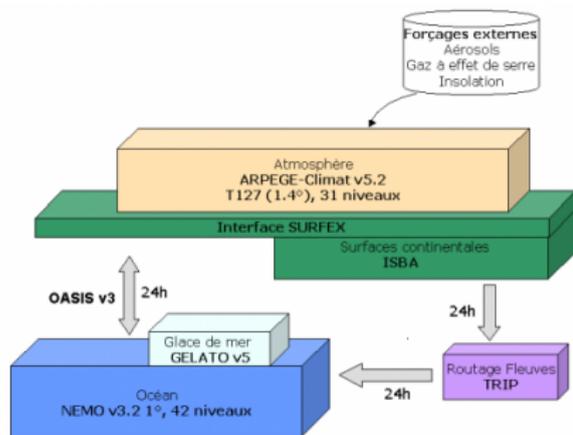
## introduction d'incertitudes de différentes natures

- ▷ ensemble de modèles ( $\rightarrow$  exercices CMIP)
- ▷ ensemble de simulations
- ▷ ensemble de paramètres/paramétrisations

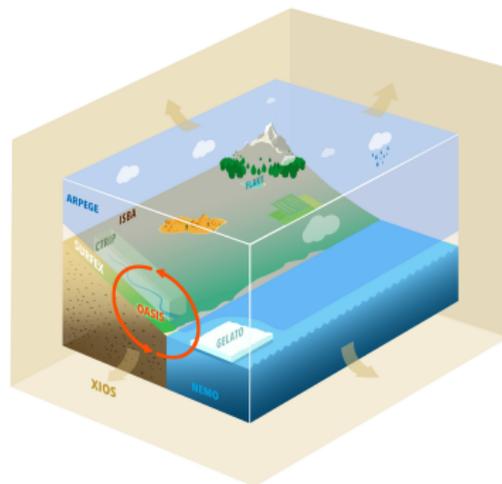
# Axe(s) de recherche

→ Contribution au développement des modèles climatiques du CNRM

CNRM-CM5 (Voltaire et al. 2013)



CNRM-CM6 (Voltaire et al. 2020)



CNRM-CM

→ en particulier, la composante atmosphérique, ARPEGE-Climat (Roehrig et al. 2020)

# Axe(s) de recherche

→ Contribution au développement des modèles climatiques du CNRM

→ dans cet exposé, je détaillerai mes travaux sur :

1. Inclusion de la stratosphère (dynamique et composition chimique)

2. Analyse de la sensibilité climatique

3. Utilisation de l'intelligence artificielle

# Développer un modèle de climat, c'est quoi ?

## 'Faire avancer' le modèle

→ ajout/modification d'une nouvelle composante tout en maintenant/augmentant sa 'valeur'

En réponse à :

- un nouveau questionnement (nouvelles observations, nouvelles hypothèses, ...),
- une augmentation de la capacité de calcul,
- une nouvelle application possible, ...

# Développer un modèle de climat, c'est quoi ?

'Faire avancer' le modèle

→ ajout/modification d'une nouvelle composante tout en maintenant/augmentant sa 'valeur'

'Savoir le faire marcher' (*le modèle est bien simulé*)

▷ intégration, versionnage, documentation, etc

# Développeur d'un modèle de climat, c'est quoi ?

## 'Faire avancer' le modèle

→ ajout/modification d'une nouvelle composante tout en maintenant/augmentant sa 'valeur'

## 'Savoir le faire marcher' (*le modèle est bien simulé*)

▷ intégration, versionnage, documentation, etc

## Par exemple

- introduire/documenter un module de chimie stratosphérique (Michou, St-Martin, Teyssède et al., 2011)
- faire fonctionner/documenter la nouvelle version d'ARPEGE-Climat (Roehrig, Beau, St-Martin et al., 2020)

# Développer un modèle de climat, c'est quoi ?

## 'Faire avancer' le modèle

→ ajout/modification d'une nouvelle composante tout en maintenant/augmentant sa 'valeur'

## 'Savoir le faire marcher' (*le modèle est bien simulé*)

▷ intégration, versionnage, documentation, etc

## 'Savoir pourquoi il marche' (*le simulé est bien compris*)

- ▷ expériences académiques (offline, unidimensionnelle, étude de cas, ...)
- ▷ comparaison à des modèles 'simples' ou 'frontière'
- ▷ quantification des incertitudes paramétriques

# Développeur d'un modèle de climat, c'est quoi ?

## 'Faire avancer' le modèle

→ ajout/modification d'une nouvelle composante tout en maintenant/augmentant sa 'valeur'

## 'Savoir le faire marcher' (*le modèle est bien simulé*)

▷ intégration, versionnage, documentation, etc

## 'Savoir pourquoi il marche' (*le simulé est bien compris*)

- ▷ expériences académiques (offline, unidimensionnelle, étude de cas, ...)
- ▷ comparaison à des modèles 'simples' ou 'frontière'
- ▷ quantification des incertitudes paramétriques

## Par exemple

- modèles 'simples' de bilan d'énergie (Geoffroy, St-Martin et al., 2013a,b; St-Martin et al., 2019)

# Développeur d'un modèle de climat, c'est quoi ?

## 'Faire avancer' le modèle

→ ajout/modification d'une nouvelle composante tout en maintenant/augmentant sa 'valeur'

## 'Savoir le faire marcher' (*le modèle est bien simulé*)

▷ intégration, versionnage, documentation, etc

## 'Savoir pourquoi il marche' (*le simulé est bien compris*)

- ▷ expériences académiques (offline, unidimensionnelle, étude de cas, ...)
- ▷ comparaison à des modèles 'simples' ou 'frontière'
- ▷ quantification des incertitudes paramétriques

## Par exemple

- modèles 'jouet' (Balogh, St-Martin et Ribes, 2021 & 2022)

# Développer un modèle de climat, c'est quoi ?

## 'Faire avancer' le modèle

→ ajout/modification d'une nouvelle composante tout en maintenant/augmentant sa 'valeur'

## 'Savoir le faire marcher' (*le modèle est bien simulé*)

- ▷ intégration, versionnage, documentation, etc

## 'Savoir pourquoi il marche' (*le simulé est bien compris*)

- ▷ expériences académiques (offline, unidimensionnelle, étude de cas, ...)
- ▷ comparaison à des modèles 'simples' ou 'frontière'
- ▷ quantification des incertitudes paramétriques

## 'Savoir jusqu'où il peut aller' (*le réel est bien simulé*)

- ▷ comparaison avec les observations, les autres modèles du même type
- ▷ évaluations interne et externe
- ▷ quantification des incertitudes modèle

# Développeur d'un modèle de climat, c'est quoi ?

## 'Faire avancer' le modèle

→ ajout/modification d'une nouvelle composante tout en maintenant/augmentant sa 'valeur'

## 'Savoir le faire marcher' (*le modèle est bien simulé*)

- ▷ intégration, versionnage, documentation, etc

## 'Savoir pourquoi il marche' (*le simulé est bien compris*)

- ▷ expériences académiques (offline, unidimensionnelle, étude de cas, ...)
- ▷ comparaison à des modèles 'simples' ou 'frontière'
- ▷ quantification des incertitudes paramétriques

## 'Savoir jusqu'où il peut aller' (*le réel est bien simulé*)

- ▷ comparaison avec les observations, les autres modèles du même type
- ▷ évaluations interne et externe
- ▷ quantification des incertitudes modèle

## Par exemple

- évaluation du modèle CNRM-CM6 (Voldoire, St-Martin et al., 2019)
- analyse de sa sensibilité climatique (St-Martin et al., 2020)

# Développeur d'un modèle de climat, c'est quoi ?

## 'Faire avancer' le modèle

→ ajout/modification d'une nouvelle composante tout en maintenant/augmentant sa 'valeur'

## 'Savoir le faire marcher' (*le modèle est bien simulé*)

- ▷ intégration, versionnage, documentation, etc

## 'Savoir pourquoi il marche' (*le simulé est bien compris*)

- ▷ expériences académiques (offline, unidimensionnelle, étude de cas, ...)
- ▷ comparaison à des modèles 'simples' ou 'frontière'
- ▷ quantification des incertitudes paramétriques

## 'Savoir jusqu'où il peut aller' (*le réel est bien simulé*)

- ▷ comparaison avec les observations, les autres modèles du même type
- ▷ évaluations interne et externe
- ▷ quantification des incertitudes modèle

## Par exemple

- analyse de la dispersion inter-modèles dans CMIP5 (Geoffroy, St-Martin et Ribes, 2012)

# Curriculum Vitae

## Parcours universitaire/professionnel

Thèse de doctorat (Daniel Cariolle)

Chercheur CNRM/GMGEC (CAIAC → AMACS → ATMO)

## Activités de recherche

48 publications revues de rang A

Conférences et séminaires

## Collaborations

4 post-doctorants

Participation à plusieurs projets nationaux (STRADYVARIUS, MORDICUS, TC2, IMPACT, ...) ou internationaux (CCMI, CMIP, ...)

## Activités d'encadrement

5 stages M1/M2

3 thèses

→ Gaëlle Ouzeau (2009-2012 ; dir. : H. Douville)

→ Blanka Balogh (2019-2022 ; co-dir. : A. Ribes)

→ Octave Tessiot (2021-2024 ; co-dir. : O. Geoffroy et L. Batté)

# Thématiques de recherches

## Dynamique stratosphérique

Daniel Cariolle, François Lott, Riwal Plougonven, Gaëlle Ouzeau (thèse), Hervé Douville, Yannick Peings, etc

## Chimie stratosphérique

Hubert Teysseire, Martine Michou, Dirk Olivie, Fernand Karcher, Daniel Cariolle, etc

## Modélisation globale

Aurore Voltaire, Stéphane Sènesi, Bertrand Decharme, Odile Thouron, Antoinette Alias, groupe de travail CMIP6, etc

## Sensibilité climatique

Olivier Geoffroy, Aurore Voltaire, Dirk Olivie, Gilles Bellon, Julien Cattiaux, etc

## Intelligence artificielle

Blanka Balogh (thèse), Aurélien Ribes, Octave Tessiot (thèse), Olivier Geoffroy, Lauriane Batté, etc

# La modélisation de la stratosphère

# La modélisation de la stratosphère

- Pourquoi ?
  - ▷ Rôle dans le bilan radiatif, la composition chimique
  - ▷ Influence dynamique sur la circulation atmosphérique (→ **thèse de Gaëlle Ouzeau**)
  - ▷ à différentes échelles de temps (e.g. [Gerber et al., 2012](#))

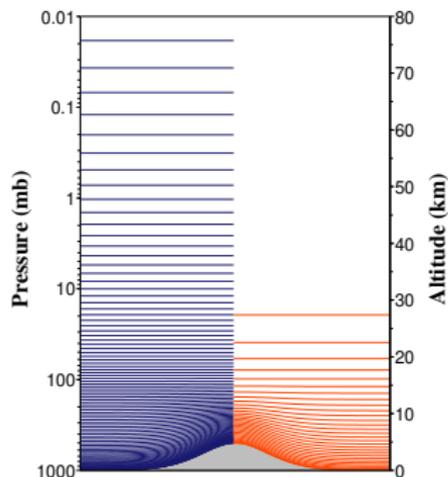
# La modélisation de la stratosphère

- Pourquoi ?

- ▷ Rôle dans le bilan radiatif, la composition chimique
- ▷ Influence dynamique sur la circulation atmosphérique (→ **thèse de Gaëlle Ouzeau**)
- ▷ à différentes échelles de temps (e.g. [Gerber et al., 2012](#))

- Comment ?

→ Une simple 'extension spatiale' ?



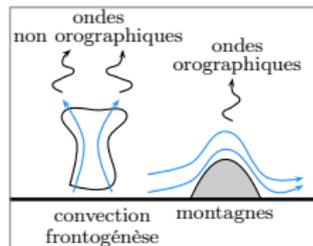
Répartition verticale des niveaux verticaux ARPEGE-Climat  
bleu : n=91 → CNRM-CM6 ; orange : n=31 → CNRM-CM5

# La modélisation de la stratosphère

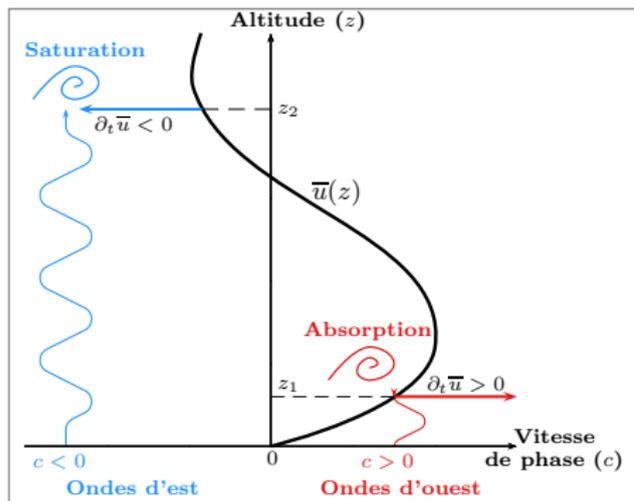
- Pourquoi ?
  - ▷ Rôle dans le bilan radiatif, la composition chimique
  - ▷ Influence dynamique sur la circulation atmosphérique (→ **thèse de Gaëlle Ouzeau**)
  - ▷ à différentes échelles de temps (e.g. [Gerber et al., 2012](#))
- Comment ?
  - Une simple 'extension spatiale' ?
  - Dans la pratique, pas seulement...
    - Amélioration de certaines composantes (paramétrisation des ondes de gravité)
    - Description détaillée de la composition chimique

# Les ondes de gravité

- Générées dans la troposphère par une variété de sources
- Échelles spatio-temporelles petites
  - ▷ horizontale : 10 - 500 km
  - ▷ verticale : 0.1 - 10 km



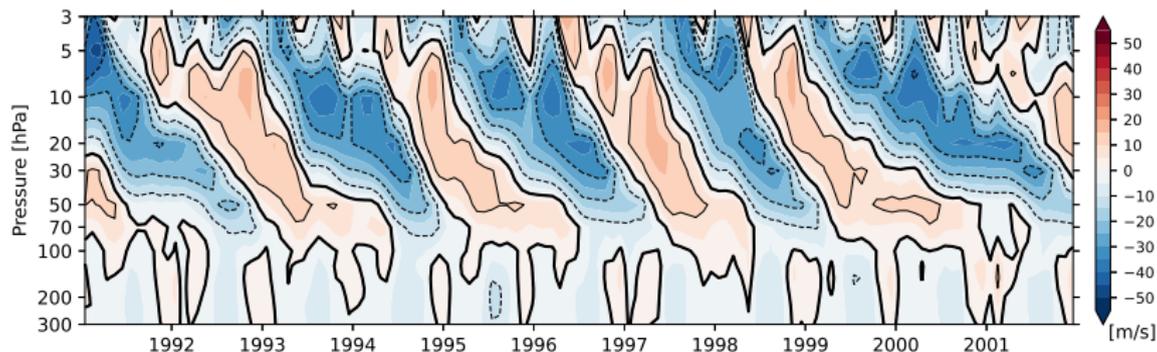
- Transport de quantité de mouvement jusque dans la stratosphère et la mésosphère



- Propagation verticale
- Dissipation
  - Absorption par niveaux critiques ( $c = \bar{u}$ )
    - ▷ **Oscillation quasi-biennale**
  - Saturation par instabilité(s)
    - ▷ **Circulation mésosphérique**

# L'oscillation quasi-biennale (QBO)

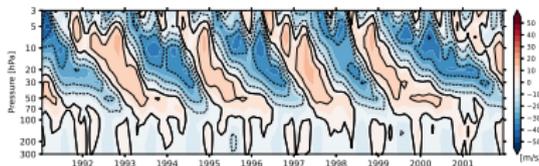
- Alternance de vents d'est/d'ouest dans la stratosphère équatoriale (période moy. de 28 mois)



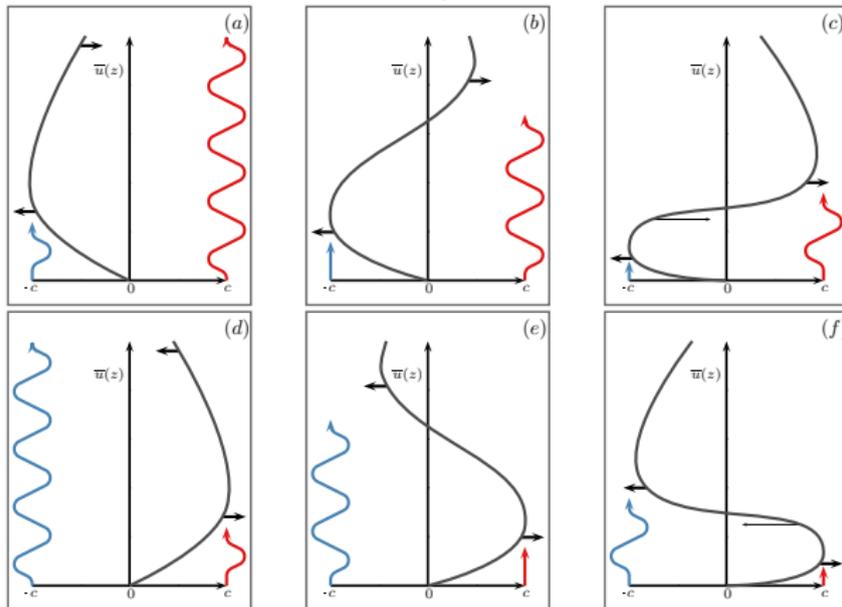
Série temporelle (période 1991-2001) de la moyenne zonale du vent zonal équatorial (données : ERA5)

# L'oscillation quasi-biennale (QBO)

- Alternance de vents d'est/d'ouest dans la stratosphère équatoriale (période moy. de 28 mois)

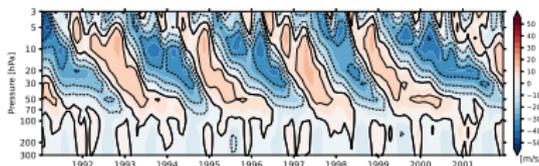


- Théorie (e.g. [Holton et Lindzen, 1972](#); [Plumb, 1977](#))

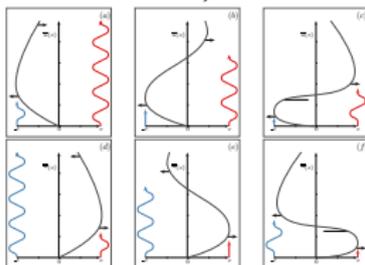


# L'oscillation quasi-biennale (QBO)

- Alternance de vents d'est/d'ouest dans la stratosphère équatoriale (période moy. de 28 mois)

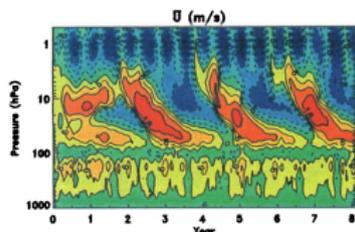


- Théorie (e.g. [Holton et Lindzen, 1972](#); [Plumb, 1977](#))



- Pratique (e.g. [Takahashi, 1999](#); [Scaife et al., 2000](#))

→ Difficultés pour les modèles climatiques à simuler la QBO



Première simulation d'une QBO dans un GCM ([Takahashi, 1999](#))

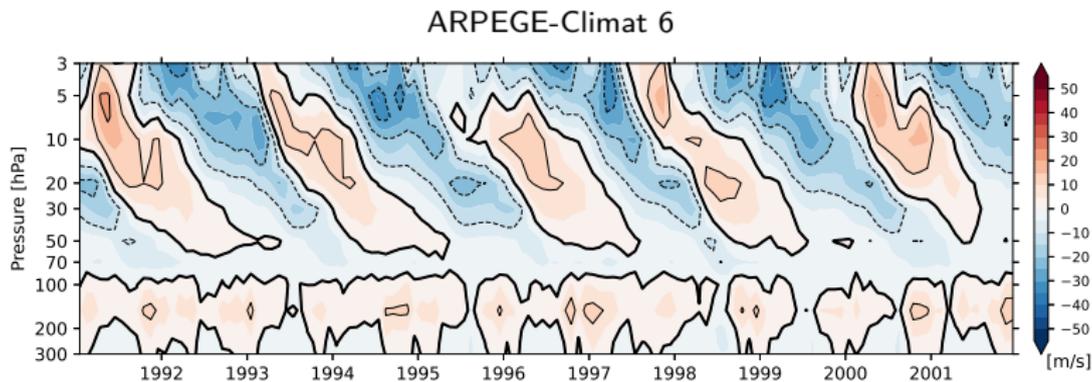
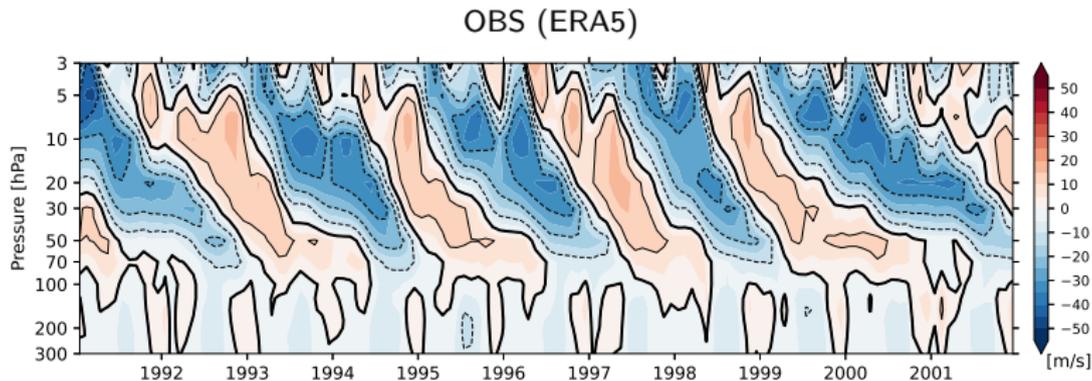
# Les ondes de gravité dans les modèles de climat

- ▷ Représentation simplifiée de leurs effets : **paramétrisation**.
  - ▷ 2 types de paramétrisations : ondes orographiques et **non orographiques**.
  - ▷ 3 éléments majeurs :
    - description des sources
    - description de la propagation (verticale)
    - représentation des critères de dissipation
- implémentation dans ARPEGE-Climat d'une paramétrisation 'stochastique' (Lott et al., 2012)
- ajout des sources convectives (Lott et Guez, 2013) & fronts (de la Camara et Lott, 2015)
- propriété essentielle des ondes de gravité : intermittence (de la Camara et al., 2014)
- 'réglage/calibration' de la paramétrisation
- campagne d'observations (Vorcore; Herzog et al., 2008)
  - simulations climatiques : état moyen (jets) et variabilité (QBO, SAO, SSW)

# Les ondes de gravité dans ARPEGE-Climat

- ▷ Représentation simplifiée de leurs effets : **paramétrisation**.
- ▷ 2 types de paramétrisations : ondes orographiques et **non orographiques**.
- ▷ 3 éléments majeurs :
  - description des sources
  - description de la propagation (verticale)
  - représentation des critères de dissipation
- implémentation dans ARPEGE-Climat d'une paramétrisation 'stochastique' (Lott et al., 2012)
- ajout des sources convectives (Lott et Guez, 2013) & fronts (de la Camára et Lott, 2015)
  - propriété essentielle des ondes de gravité : intermittence (de la Camára et al., 2014)
- 'réglage/calibration' de la paramétrisation
  - campagne d'observations (Vorcore ; Herzog et al., 2008)
  - simulations climatiques : état moyen (jets) et variabilité (QBO, SAO, SSW)

# L'oscillation quasi-biennale dans ARPEGE-Climat



→ Simulation d'une QBO (dans toutes les config. : ARPEGE-Climat, CNRM-CM, CNRM-ESM)

# La composition chimique de la stratosphère

→ Décrire l'évolution de l'ozone

- 'Module' de chimie stratosphérique ([Lefèvre et al, 1994](#) ; [Teyssède et al, 2007](#))
  - ▷ évolution de  $\sim 70$  espèces via  $\sim 250$  réactions chimiques (solveur)
- Intégration dans le modèle atmosphérique ([Saint-Martin, 2010](#) ; [Michou et al., 2011](#))
  - ▷ Transport des espèces (advection grande échelle, sous-maille)
  - ▷ Couplage avec le module de transfert radiatif
  - ▷ Cohérence 'physique' (couplage dynamique/chimie) et 'technique' (coûts de calcul)
- Maintien d'une version simplifiée (ozone 'linéaire' ; [Cariolle et Teyssède, 2007](#))

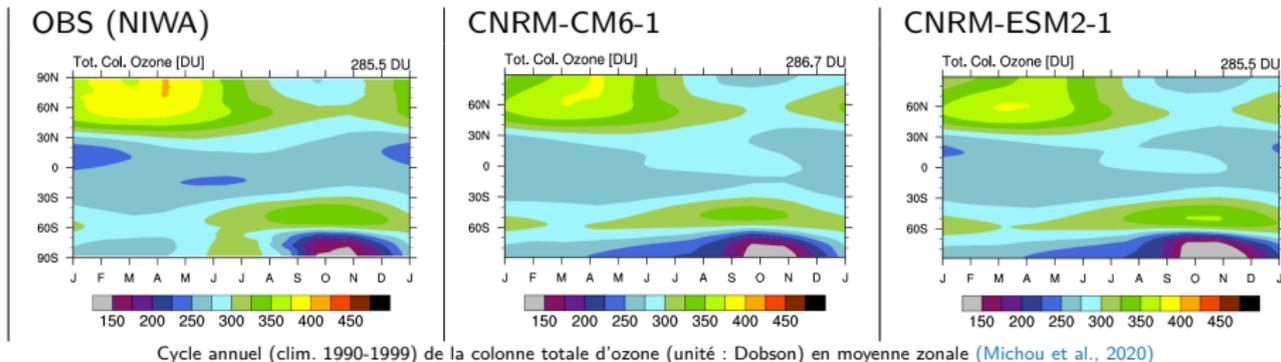
# La composition chimique de la stratosphère

→ Décrire l'évolution de l'ozone

- 'Module' de chimie stratosphérique (Lefèvre et al, 1994 ; Teysède et al, 2007)
- Intégration dans le modèle atmosphérique (Saint-Martin, 2010 ; Michou et al., 2011)
- Maintien d'une version simplifiée (ozone 'linéaire' ; Cariolle et Teysède, 2007)

→ Résultats

- ▷ Colonne totale d'ozone → cohérence 'chimique'



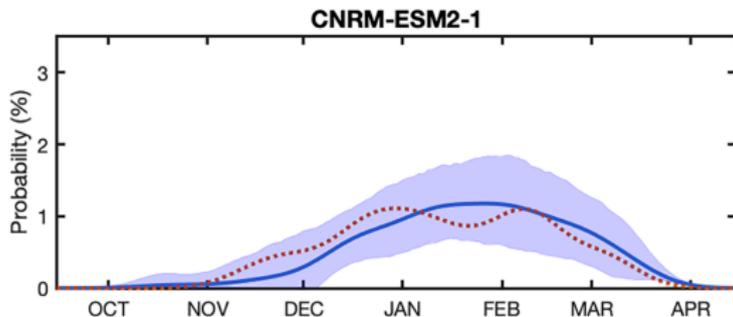
# La composition chimique de la stratosphère

→ Décrire l'évolution de l'ozone

- 'Module' de chimie stratosphérique (Lefèvre et al, 1994 ; Teysseire et al, 2007)
- Intégration dans le modèle atmosphérique (Saint-Martin, 2010 ; Michou et al., 2011)
- Maintien d'une version simplifiée (ozone 'linéaire' ; Cariolle et Teysseire, 2007)

→ Résultats

- ▷ Colonne totale d'ozone → cohérence 'chimique'
- ▷ Réchauffements stratosphériques soudains → cohérence 'dynamique'



Fréquence d'occurrence des SSWs JRA-55 (pointillés rouge) et CNRM-ESM2-1 (bleu) (Ayarzaguëna et al., 2020)

# La composition chimique de la stratosphère

→ Décrire l'évolution de l'ozone

- 'Module' de chimie stratosphérique ([Lefèvre et al, 1994](#) ; [Teyssède et al, 2007](#))
- Intégration dans le modèle atmosphérique ([Saint-Martin, 2010](#) ; [Michou et al., 2011](#))
- Maintien d'une version simplifiée (ozone 'linéaire' ; [Cariolle et Teyssède, 2007](#))

→ Résultats

- ▷ Colonne totale d'ozone → cohérence 'chimique'
- ▷ Réchauffements stratosphériques soudains → cohérence 'dynamique'
- ▷ Travail similaire pour module d'aérosols interactifs ([Michou et al., 2015](#))

# La sensibilité climatique à l'équilibre

# La sensibilité climatique à l'équilibre

- Une question simple...

→ Quelle est la variation de la température moyenne à la surface de la Terre quand la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est multipliée par deux ?

# La sensibilité climatique à l'équilibre

- Une question simple...

→ Quelle est la variation de la température moyenne à la surface de la Terre quand la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est multipliée par deux ?

- Une réponse plus ou moins simple...

- effet de serre (e.g. [Fourier](#), [Foote](#), [Arrhenius](#))

- ▷ environ 5 degrés

- rétroactions atmosphériques : équilibre radiatif-convectif (e.g. [Manabe et Wetherald, 1967](#))

- dynamique atmosphérique : GCM (e.g. [Charney, 1979](#))

- ▷ entre 1.5 et 4.5 degrés

- 'faisceau d'indices' : obs. passées/présentes, AOGCM, etc (e.g. [Sherwood et al., 2020](#))

- ▷ entre 2.3 et 4.7 degrés

- Intérêt des modèles conceptuels (forçage/rétroactions, de bilan d'énergie, ...)

# Le 'concept' de forçage/rétroactions

→ Flux radiatif net au sommet de l'atmosphère  $R \equiv R(e, T_s, x_i(e, T_s))$  dépend de :

- la concentration en  $\text{CO}_2$  atmosphérique,  $e$ ,
- la température de surface,  $T_s$ ,
- la valeur de certains 'agents radiatifs' (e.g. vapeur d'eau, nuages, albedo),  $x_i$ .

→ En réponse à une perturbation  $\Delta e$ , à l'ordre 1

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial e} \Delta e + \sum_i \left( \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial e} \Delta e + \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial T_s} \Delta T_s \right)$$

$$\boxed{\Delta R = \mathcal{F}_{tot} + \lambda_{tot} \Delta T_s}$$

- **Forçage**

$$\mathcal{F}_{tot} = \frac{\partial R}{\partial e} \Delta e + \sum_i \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial e} \Delta e$$

- **Rétroaction(s)**

$$\lambda_{tot} = \sum_i \lambda_i = \sum_i \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial T_s}$$

# Le 'concept' de forçage/rétroactions

→ Méthodes d'estimation des différentes rétroactions (e.g. [Soden et Held, 2006](#); [Geoffroy et al., 2014](#))

# Le 'concept' de forçage/rétroactions

- Méthodes d'estimation des différentes rétroactions (e.g. Soden et Held, 2006 ; Geoffroy et al., 2014)
- Estimation de l'ECS par régression linéaire (Gregory et al., 2004)

→ à partir de simulations avec forçage constant dans le temps (e.g. abrupt-4xCO2)

$$\Delta R(t) = \mathcal{F}_{tot} + \lambda_{tot} \Delta T_s(t)$$

- À l'équilibre,  $\Delta R = 0$  et :

$$\Delta T_s \equiv \Delta T_{eq} = -\frac{\mathcal{F}_{tot}}{\lambda_{tot}}$$

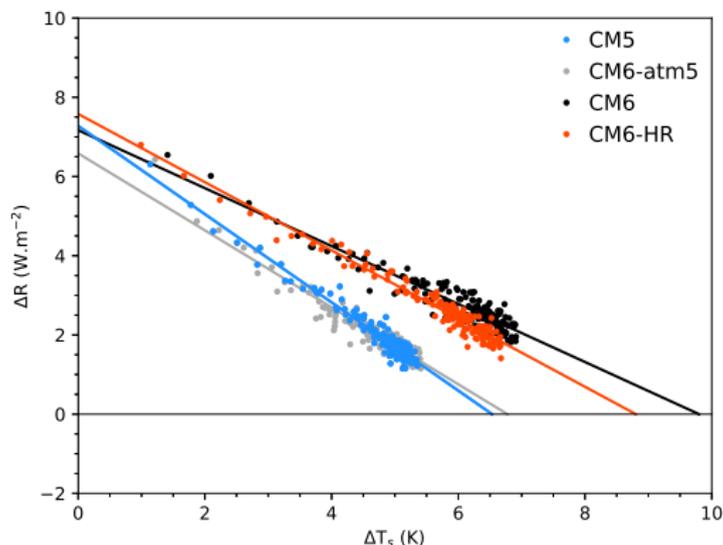
- Si  $\Delta e$  correspond à un doublement de la concentration en CO<sub>2</sub>, par définition,  $\Delta T_{eq} = \text{ECS}$ .

→  $\mathcal{F}_{tot}$ ,  $\lambda_{tot}$  : coefficients de la régression linéaire entre les couples de valeurs  $\{\Delta T_s(t), \Delta R(t)\}_t$

# Le 'concept' de forçage/rétroactions

→ Méthodes d'estimation des différentes rétroactions (e.g. Soden et Held, 2006 ; Geoffroy et al., 2014)

→ Estimation de l'ECS par régression linéaire (Gregory et al., 2004)



Évolution de  $\{\Delta T_s(t), \Delta R(t)\}_t$  dans des simulations abrupt4xCO2 (Saint-Martin et al., 2021)

→ ECS (CNRM-CM6) = 4.9 K > ECS (CNRM-CM5) = 3.2 K  $\approx$  ECS(CNRM-CM6-atm5)

# Le chemin vers l'équilibre

→ bilan d'énergie : énergie reçue  $\Delta R$  par le système égale à l'énergie stockée

→ séparation en 2 sous-systèmes

- atmosphère + surfaces + océan superficiel ; capacité thermique  $c$ , température  $\Delta T_s$
- océan profond ; capacité thermique  $c_0 \gg c$ , température  $\Delta T_0$

$$c \frac{d\Delta T_s}{dt} = \Delta R - H$$

$$c_0 \frac{d\Delta T_0}{dt} = H$$

# Le chemin vers l'équilibre

→ bilan d'énergie : énergie reçue  $\Delta R$  par le système égale à l'énergie stockée

→ séparation en 2 sous-systèmes

- atmosphère + surfaces + océan superficiel ; capacité thermique  $c$ , température  $\Delta T_s$
- océan profond ; capacité thermique  $c_0 \gg c$ , température  $\Delta T_0$

$$c \frac{d\Delta T_s}{dt} = \Delta R - H$$

$$c_0 \frac{d\Delta T_0}{dt} = H$$

→ énergie échangée entre les deux sous-systèmes,  $H$  : coefficient de transfert thermique  $\gamma$

▷ Modèle de bilan d'énergie (EBM) à 2 couches (Gregory, 2000 ; Held et al., 2010)

$$\begin{aligned} c \frac{d\Delta T_s}{dt} &= \mathcal{F}_{tot}(t) + \lambda_{tot} \Delta T_s - \gamma(\Delta T_s - \Delta T_0), \\ c_0 \frac{d\Delta T_0}{dt} &= \gamma(\Delta T_s - \Delta T_0), \end{aligned}$$

# Le chemin vers l'équilibre

→ bilan d'énergie : énergie reçue  $\Delta R$  par le système égale à l'énergie stockée

→ séparation en 2 sous-systèmes

- atmosphère + surfaces + océan superficiel ; capacité thermique  $c$ , température  $\Delta T_s$
- océan profond ; capacité thermique  $c_0 \gg c$ , température  $\Delta T_0$

$$c \frac{d\Delta T_s}{dt} = \Delta R - H$$

$$c_0 \frac{d\Delta T_0}{dt} = H$$

→ énergie échangée entre les deux sous-systèmes,  $H$  : coefficient de transfert thermique  $\gamma$

▷ Modèle de bilan d'énergie (EBM) à 2 couches (Gregory, 2000 ; Held et al., 2010)

$$\begin{aligned} c \frac{d\Delta T_s}{dt} &= \mathcal{F}_{tot}(t) + \lambda_{tot} \Delta T_s - \varepsilon \gamma (\Delta T_s - \Delta T_0), \\ c_0 \frac{d\Delta T_0}{dt} &= \gamma (\Delta T_s - \Delta T_0), \end{aligned}$$

→ répartition géographique du réchauffement (Winton et al., 2010 ; Geoffroy et al., 2013b)

# Le chemin vers l'équilibre

→ bilan d'énergie : énergie reçue  $\Delta R$  par le système égale à l'énergie stockée

→ séparation en 2 sous-systèmes

- atmosphère + surfaces + océan superficiel ; capacité thermique  $c$ , température  $\Delta T_s$
- océan profond ; capacité thermique  $c_0 \gg c$ , température  $\Delta T_0$

$$c \frac{d\Delta T_s}{dt} = \Delta R - H$$

$$c_0 \frac{d\Delta T_0}{dt} = H$$

→ énergie échangée entre les deux sous-systèmes,  $H$  : coefficient de transfert thermique  $\gamma$

▷ Modèle de bilan d'énergie (EBM) à 2 couches (Gregory, 2000 ; Held et al., 2010)

$$\begin{aligned} c \frac{d\Delta T_s}{dt} &= \mathcal{F}_{tot}(t) - \lambda_{tot} \Delta T_s - \varepsilon \gamma (\Delta T_s - \Delta T_0), \\ c_0 \frac{d\Delta T_0}{dt} &= \gamma (\Delta T_s - \Delta T_0), \end{aligned}$$

→ répartition géographique du réchauffement (Winton et al., 2010 ; Geoffroy et al., 2013b)

Dans la suite de l'exposé :  $\lambda_{tot} \rightarrow -\lambda_{tot}$

# Le modèle de bilan d'énergie

- ▷ Résolution analytique pour n'importe quel type de forçage :  $t \rightarrow \mathcal{F}_{tot}(t)$  (Geoffroy et al., 2013a)

# Le modèle de bilan d'énergie

▷ Résolution analytique pour n'importe quel type de forçage :  $t \rightarrow \mathcal{F}_{tot}(t)$  (Geoffroy et al., 2013a)

En pratique, on spécifie la valeur du CO<sub>2</sub>

$$n(t) = [\text{CO}_2](t)/[\text{CO}_2]_{pi}$$

et le forçage peut s'écrire

$$\mathcal{F}_{tot}(t) = \mathcal{F}_{4x} \log_4(n(t))$$

→ simulation abrupt-4xC02 = forçage en marche d'escalier

$$\mathcal{F}_{tot}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < 0 \\ \mathcal{F}_{4x} & \text{if } t \geq 0 \end{cases}$$

→ simulation 1pctC02 = forçage linéaire

$$\mathcal{F}_{tot}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < 0 \\ \mathcal{F}_{4x} \log_4(1.01)t & \text{if } t \geq 0 \end{cases}$$

Dans ce cas,  $n(t=70 \text{ ans}) \approx 2$  et  $\Delta T_s(t=70 \text{ ans}) = \text{TCR}$  (réponse climatique transitoire).

# Le modèle de bilan d'énergie

▷ Résolution analytique pour n'importe quel type de forçage :  $t \rightarrow \mathcal{F}_{tot}(t)$  (Geoffroy et al., 2013a)

En réponse à un forçage en *marche d'escalier*, on a

$$\Delta T_{eq} = \mathcal{F}_{\infty} / \lambda_{tot}$$
$$\Delta T(t) = \Delta T_{eq} - \Delta T_{eq} \sum_{n=\{f,s\}} a_n e^{-t/\tau_n}$$

→ 2 temps de réponse (e.g. Hasselmann, 1976 ; Olivié et al. 2012)

- une dizaine d'années :

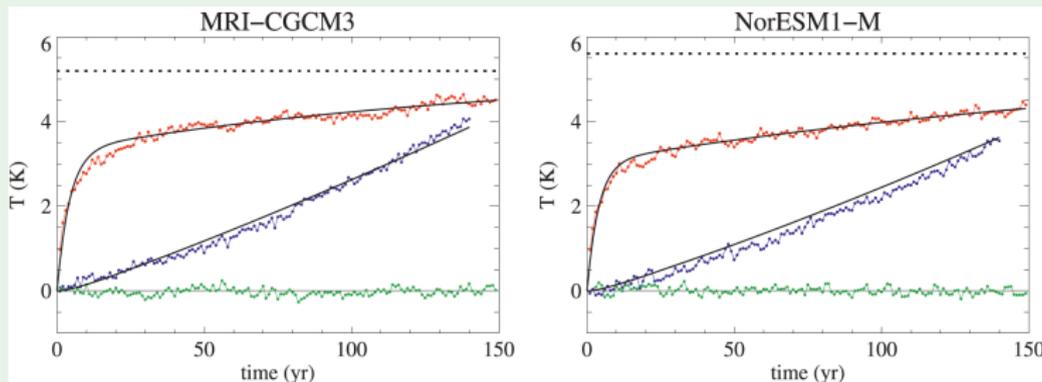
$$\tau_f \approx c / (\lambda_{tot} + \gamma)$$

- plusieurs centaines d'années :

$$\tau_s \approx c_0 (\lambda_{tot} + \gamma) / (\lambda_{tot} \gamma)$$

# Le modèle de bilan d'énergie

- ▷ Résolution analytique pour n'importe quel type de forçage :  $t \rightarrow \mathcal{F}_{tot}(t)$  (Geoffroy et al., 2013a)
- ▷ 'Applications'
  - émuler les réponses des AOGCMs (Geoffroy et al., 2013a,b; Geoffroy et Saint-Martin, 2019)



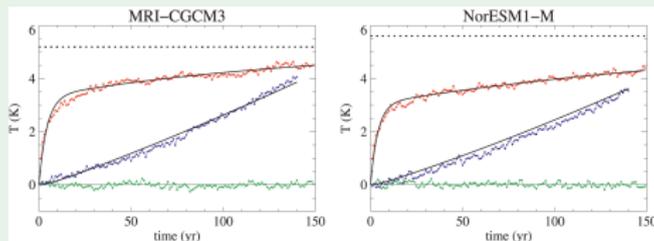
Anomalie de la température moyenne globale : contrôle (vert), abrupt4xCO2 (rouge), 1pctCO2 (bleu) vs EBM (noir) (Geoffroy et al., 2013a)

→ MRI-CGCM3 :  $\Delta T_{eq} = 5.2$  K,  $\tau_f = 4.3$  ans et  $\tau_s = 150$  ans

→ NorESM1-M :  $\Delta T_{eq} = 5.6$  K,  $\tau_f = 4.0$  ans et  $\tau_s = 218$  ans

# Le modèle de bilan d'énergie

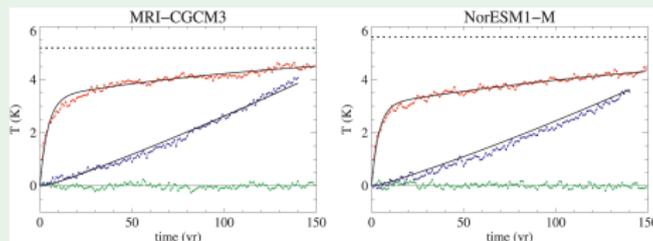
- ▷ Résolution analytique pour n'importe quel type de forçage :  $t \rightarrow \mathcal{F}_{tot}(t)$  (Geoffroy et al., 2013a)
- ▷ 'Applications'
  - émuler les réponses des AOGCMs (Geoffroy et al., 2013a,b; Geoffroy et Saint-Martin, 2019)



- analyser le contraste de réchauffement océan/surfaces continentales (Geoffroy et al., 2015)
- extraire la répartition géographique des réchauffements associés à chaque temps de réponse (Geoffroy et Saint-Martin, 2014)
- quantifier l'origine de la dispersion des réponses des AOGCMs (Geoffroy et al., 2012)
- concevoir une méthode pour accélérer la mise à l'équilibre (Saint-Martin et al., 2019)

# Le modèle de bilan d'énergie

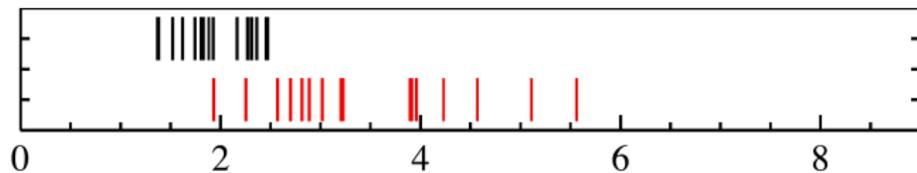
- ▷ Résolution analytique pour n'importe quel type de forçage :  $t \rightarrow \mathcal{F}_{tot}(t)$  (Geoffroy et al., 2013a)
- ▷ 'Applications'
  - émuler les réponses des AOGCMs (Geoffroy et al., 2013a,b; Geoffroy et Saint-Martin, 2019)



- analyser le contraste de réchauffement océan/surfaces continentales (Geoffroy et al., 2015)
- extraire la répartition géographique des réchauffements associés à chaque temps de réponse (Geoffroy et Saint-Martin, 2014)
- quantifier l'origine de la dispersion des réponses des AOGCMs (Geoffroy et al., 2012)
- concevoir une méthode pour accélérer la mise à l'équilibre (Saint-Martin et al., 2019)

# Analyse des sources de dispersion (Geoffroy et al., 2012)

- But : analyser la dispersion des TCR/ECS des modèles de climat



Distribution des TCR (noir) et ECS (rouge) pour un ensemble de 16 modèles CMIP5 (Geoffroy et al., 2012)

# Analyse des sources de dispersion (Geoffroy et al., 2012)

- But : analyser la dispersion des TCR/ECS des modèles de climat

(i) émuler la réponse de chaque modèle  $i$  par la solut. analyt.  $g$  et les paramètres  $\Theta^{(i)}$  de l'EBM

$$\Delta T_s^{(i)}(t) = g(t; \Theta^{(i)})$$

En particulier, pour la TCR,

$$T^{(i)} = \tilde{f}(\mathcal{F}_{tot}^{(i)}, \lambda_{tot}^{(i)}, \gamma^{(i)}, c^{(i)}, c_0^{(i)}, \varepsilon^{(i)}) \quad i = \{1, \dots, N\}$$

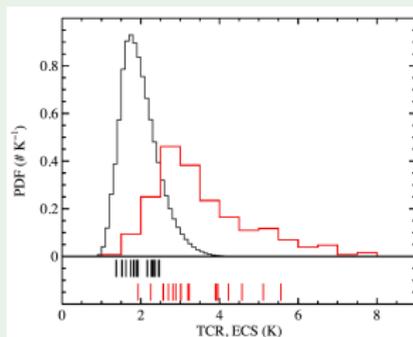
# Analyse des sources de dispersion (Geoffroy et al., 2012)

- But : analyser la dispersion des TCR/ECS des modèles de climat

(ii) estimer la contribution de chaque paramètre/'processus' à la variance de l'ensemble

1- création d'un ensemble de  $N^6$  réponses (toutes les combinaisons possibles des 6 paramètres)

$$\{T_{i,j,k,l,m,n}\} = \tilde{f}(\{\mathcal{F}_{tot}^{(i)}, \lambda_{tot}^{(j)}, \gamma^{(k)}, c^{(l)}, c_0^{(m)}, \varepsilon^{(n)}\})$$



Densités de probabilité de la TCR (noir) et de l'ECS (rouge) obtenues a/c de toutes les combinaisons possibles de paramètres (Geoffroy et al., 2012)

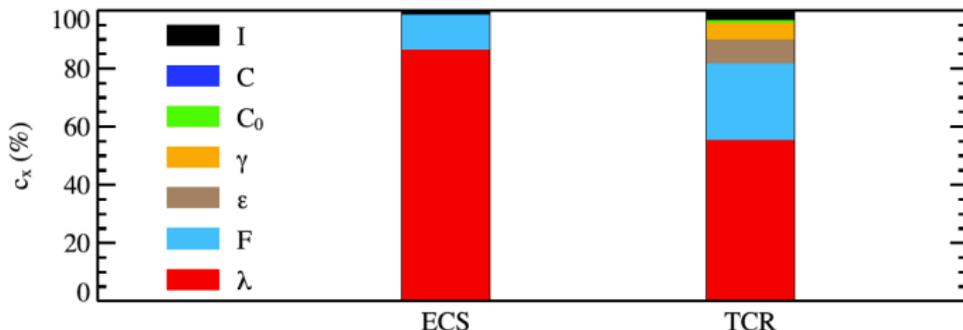
2- méthode en analyse de variance (ANOVA) :  $Var(T) = (c_{\mathcal{F}_{tot}} + \dots + c_{\varepsilon} + c_I)Var(T)$

$$c_x = \frac{1}{Var(T)} \frac{1}{N_x} \sum_i \left[ \frac{1}{N_y \dots N_z} \sum_{j \dots n} (T_{i,j,k,l,m,n} - \bar{T}) \right]^2$$

# Analyse des sources de dispersion (Geoffroy et al., 2012)

- But : analyser la dispersion des TCR/ECS des modèles de climat

- émuler la réponse de chaque modèle  $i$  par la solut. analyt.  $g$  et les paramètres  $\Theta^{(i)}$  de l'EBM
- estimer la contribution de chaque paramètre/'processus' à la variance de l'ensemble



Contributions relatives de chaque paramètre (et du terme d'interaction I) à la variance de la TCR et de l'ECS (Geoffroy et al., 2012)

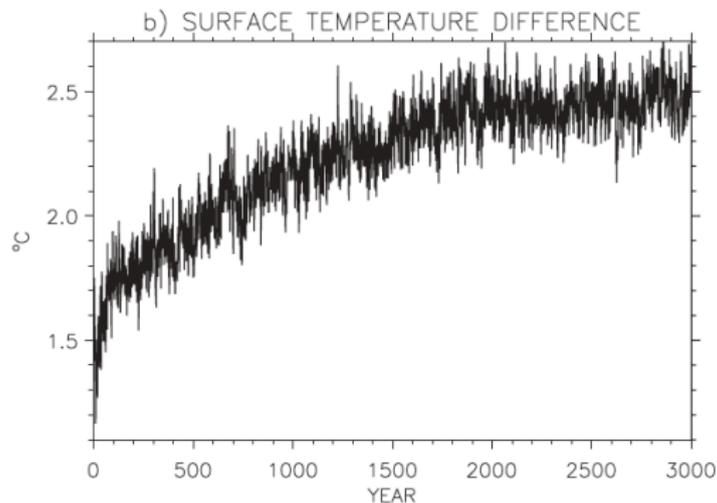
- Importance des rétroactions atmosphériques : encore vrai pour CMIP6 (e.g. Zelinka et al., 2020)

# Mise à l'équilibre accélérée : en théorie

- Objectif : disposer d'un climat perturbé (e.g. à  $\Delta T_s = 1.5/2.0$  K) et équilibré

# Mise à l'équilibre accélérée : en théorie

- Objectif : disposer d'un climat perturbé (e.g. à  $\Delta T_s = 1.5/2.0$  K) et équilibré  
→ Faire une très (très) longue simulation...



Anomalie de la température moyenne globale ; simulation abrupt2xCO2 ; modèle CCSM3 (Danabasoglu et Gent, 2009)

# Mise à l'équilibre accélérée : en théorie

- Objectif : disposer d'un climat perturbé (e.g. à  $\Delta T_s = 1.5/2.0$  K) et équilibré

→ Idée : appliquer un forçage différencié / en deux temps

En réponse à un forçage en double *marche d'escalier*

$$\mathcal{F}(t) = \begin{cases} \mathcal{F}_0 & \text{if } 0 \leq t < t_0, \\ \mathcal{F}_\infty & \text{if } t \geq t_0, \end{cases}$$

$$t \geq t_0 : \Delta T(t) = \frac{\mathcal{F}_\infty}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \sum_{n=\{f,s\}} g_n a_n e^{-t/\tau_n},$$

avec

$$g_n = (\mathcal{F}_0 - \mathcal{F}_\infty) e^{t_0/\tau_n} - \mathcal{F}_0$$

On peut calculer la durée optimale pour annuler  $g_s$  et le terme en  $e^{-t/\tau_s}$

$$t_0 = -\tau_s \ln \left( 1 - \frac{\mathcal{F}_\infty}{\mathcal{F}_0} \right)$$

→ méthode 'Fast-Forward' (Saint-Martin et al., 2019)

# Mise à l'équilibre accélérée : en théorie

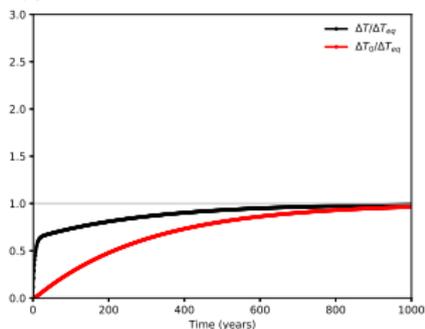
- Objectif : disposer d'un climat perturbé (e.g. à  $\Delta T_s = 1.5/2.0$  K) et équilibré  
→ Idée : appliquer un forçage différencié / en deux temps

On peut calculer la durée optimale pour annuler  $g_s$  et le terme en  $e^{-t/\tau_s}$

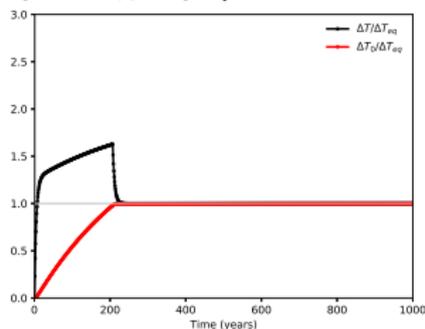
$$t_0 = -\tau_s \ln \left( 1 - \frac{\mathcal{F}_\infty}{\mathcal{F}_0} \right)$$

→ méthode 'Fast-Forward' (Saint-Martin et al., 2019)

$n_\infty$  seulement



$n_0 = 2n_\infty$ ;  $t_0$  optimal



# Mise à l'équilibre accélérée : en théorie

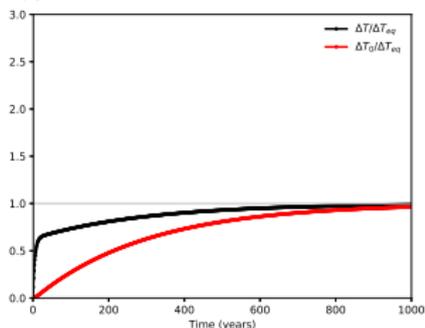
- Objectif : disposer d'un climat perturbé (e.g. à  $\Delta T_s = 1.5/2.0$  K) et équilibré  
→ Idée : appliquer un forçage différencié / en deux temps

On peut calculer la durée optimale pour annuler  $g_s$  et le terme en  $e^{-t/\tau_s}$

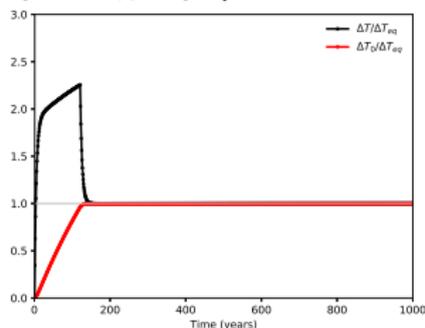
$$t_0 = -\tau_s \ln \left( 1 - \frac{\mathcal{F}_\infty}{\mathcal{F}_0} \right)$$

→ méthode 'Fast-Forward' (Saint-Martin et al., 2019)

$n_\infty$  seulement



$n_0 = 4n_\infty$ ;  $t_0$  optimal



- On peut prendre  $t_0$  aussi petit que l'on veut...

# Mise à l'équilibre accélérée : en théorie

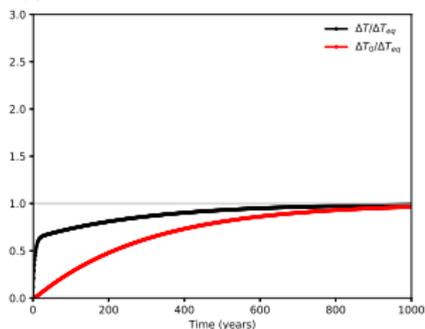
- Objectif : disposer d'un climat perturbé (e.g. à  $\Delta T_s = 1.5/2.0$  K) et équilibré  
→ Idée : appliquer un forçage différencié / en deux temps

On peut calculer la durée optimale pour annuler  $g_s$  et le terme en  $e^{-t/\tau_s}$

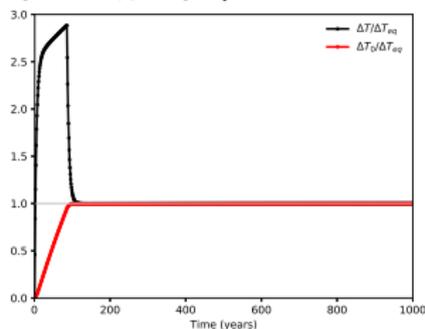
$$t_0 = -\tau_s \ln \left( 1 - \frac{\mathcal{F}_\infty}{\mathcal{F}_0} \right)$$

→ méthode 'Fast-Forward' (Saint-Martin et al., 2019)

$n_\infty$  seulement



$n_0 = 8n_\infty$ ;  $t_0$  optimal



- On peut prendre  $t_0$  aussi petit que l'on veut...
- Mais mieux vaut ne pas trop exagérer...

# Mise à l'équilibre accélérée : en théorie

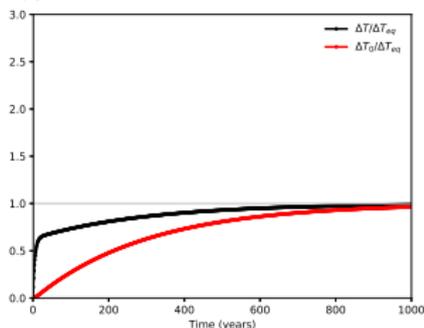
- Objectif : disposer d'un climat perturbé (e.g. à  $\Delta T_s = 1.5/2.0$  K) et équilibré  
→ Idée : appliquer un forçage différencié / en deux temps

On peut calculer la durée optimale pour annuler  $g_s$  et le terme en  $e^{-t/\tau_s}$

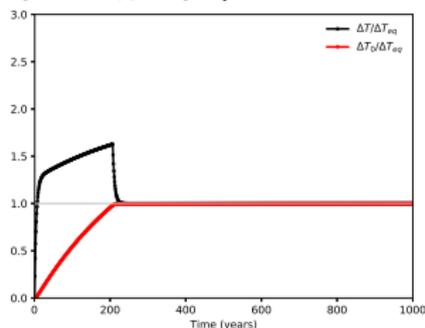
$$t_0 = -\tau_s \ln \left( 1 - \frac{\mathcal{F}_\infty}{\mathcal{F}_0} \right)$$

→ méthode 'Fast-Forward' (Saint-Martin et al., 2019)

$n_\infty$  seulement



$n_0 = 2n_\infty$ ;  $t_0$  optimal

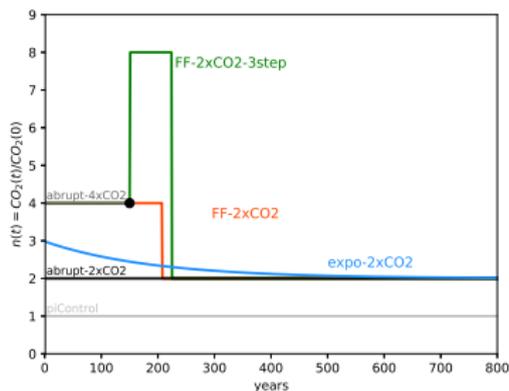


→ pour  $n_\infty = 2$ , on suggère d'utiliser  $n_0 = 4$

→ OK aussi avec un forçage en 3 temps ou exponentiellement décroissant ('fast à mille temps')

# Mise à l'équilibre accélérée : en pratique

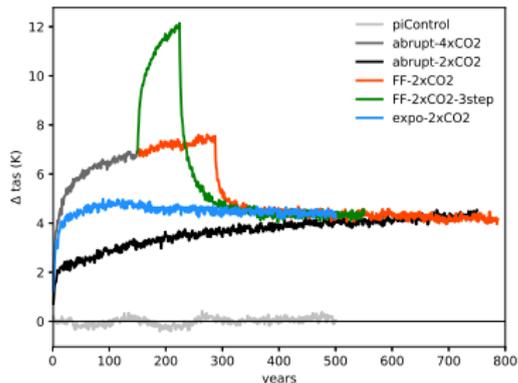
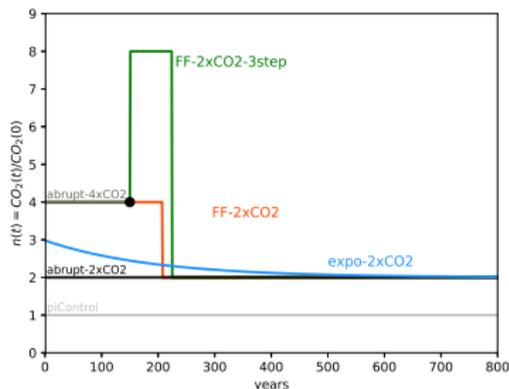
→ Simulations avec le modèle CNRM-CM6-1



- $n_\infty = 2$ ,  $n_0 = 4$  et  $t_0 = 287$  ans (→ simulation **FF-2xCO2**)
- comparaison avec la simulation 'classique' abrupt-2xCO2

# Mise à l'équilibre accélérée : en pratique

→ Simulations avec le modèle CNRM-CM6-1



Évolution temporelle de la concentration en CO<sub>2</sub> dans les expériences de type 'fast-forward' et des réponses correspondantes de la température moyenne globale (Saint-Martin et al., 2019)

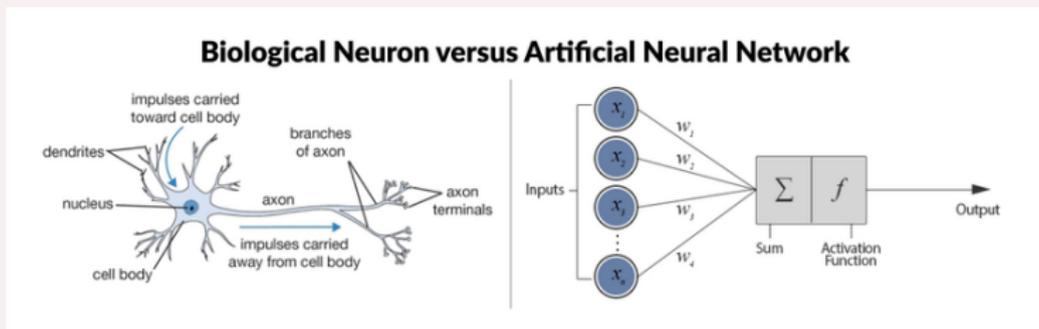
- $n_{\infty} = 2$ ,  $n_0 = 4$  et  $t_0 = 287$  ans (→ simulation **FF-2xCO<sub>2</sub>**)
- comparaison avec la simulation 'classique' abrupt-2xCO<sub>2</sub>
- ▷ Réduction du temps de mise à l'équilibre (devient de l'ordre de 350 – 400 ans).

→ Utilisation possible pour équilibres à  $\Delta T$  fixé / 'spin-up' des modèles.

# L'intelligence artificielle (IA)

# L'intelligence artificielle (IA)

- Historiquement : reproduire les facultés cognitives humaines
  - ▷ représentation mathématique du neurone biologique → le neurone artificiel



source : [datacamp.com](https://datacamp.com)

# L'intelligence artificielle (IA)

- Historiquement : reproduire les facultés cognitives humaines
  - ▷ représentation mathématique du neurone biologique → le neurone artificiel
  - ▷ assemblés en réseaux (NN) → classe de fonctions paramétriques :  $\{\hat{f}_\theta\}_\theta$
- Devenue synonyme d'apprentissage statistique ou *machine learning*
  - ▷ chercher une 'bonne' approximation d'une fonction  $f$  à partir d'une collection de  $n$  mesures  $\{x_i, y_i = f(x_i)\}_{i \leq n}$
  - ▷ les NNs : classe de fonctions particulièrement efficace pour ce problème
  - ▷ en particulier, pour  $x$  et  $y$  de très grande dimension
  - succès dans une large gamme d'applications : reconnaissance d'objets (Krizhevsky et al., 2012), traduction automatique (Sutskever et al., 2014), jeu de Go (Silver et al., 2017), etc
- Clés du succès
  - il y a toujours une 'bonne' approximation parmi les  $\{\hat{f}_\theta\}_\theta$  (e.g. Cybenko, 1989)
  - on peut la trouver 'rapidement' (algorithmes d'optimisation ; Rumelhart et al., 1986)
  - on dispose de plus en plus de données

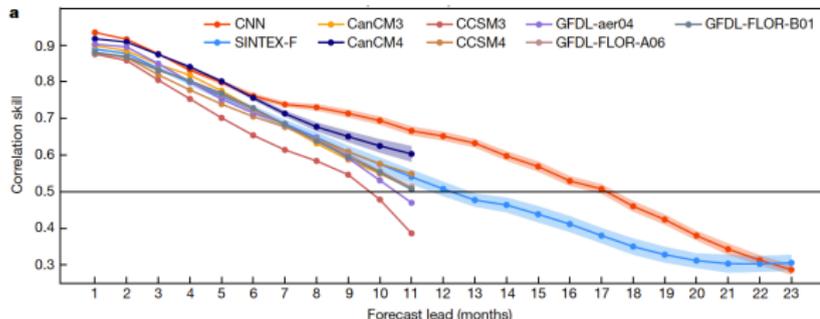
# L'IA dans la science du climat

- Une nouvelle méthode de statistiques

- ▷ même champ d'application
- exploration de données
- modélisation statistique

- Quelques exemples

- procédures de post-traitement des sorties de modèles numériques (e.g. [McGovern et al., 2017](#))
- paramétrisation sous-maille → **thèse de Blanka Balogh**
- prévision immédiate (e.g. [Sønderby et al., 2020](#)) ou prévision saisonnière (e.g. [Ham et al., 2019](#))  
→ **thèse d'Octave Tessiot**



Score de corrélation pour l'indice ENSO en fonction de l'échéance : modèles de prévision 'dynamiques' vs modèle 'IA'/CNN ([Ham et al., 2019](#))

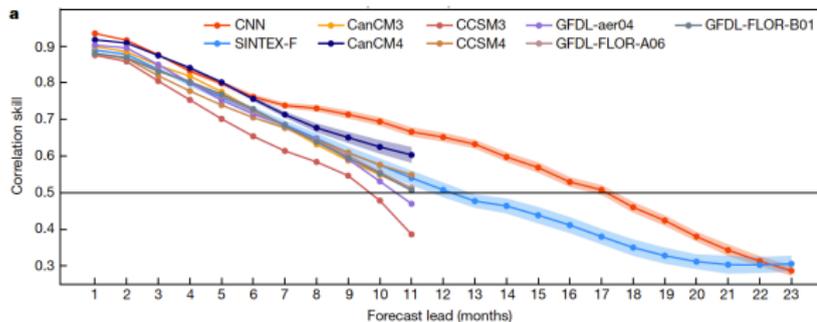
# L'IA dans la science du climat

- Une nouvelle méthode de statistiques

- ▷ même champ d'application
- exploration de données
- modélisation statistique

- Quelques exemples

- procédures de post-traitement des sorties de modèles numériques (e.g. [McGovern et al., 2017](#))
- paramétrisation sous-maille → **thèse de Blanka Balogh**
- prévision immédiate (e.g. [Sønderby et al., 2020](#)) ou prévision saisonnière (e.g. [Ham et al., 2019](#))  
→ **thèse d'Octave Tessiot**



Score de corrélation pour l'indice ENSO en fonction de l'échéance : modèles de prévision 'dynamiques' vs modèle 'IA'/CNN ([Ham et al., 2019](#))

# L'IA et les paramétrisations sous-maille

- évolution des variables d'état  $\mathbf{x}$  dans une maille  $i$

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathcal{D}(\mathbf{x}, t) + \sum_j \varphi_j(\mathbf{x}_i; \theta_j)$$

- ▷  $\mathcal{D}$  ('dynamique') : résolution approchée des équations primitives
- ▷  $\{\varphi_j\}$  ('physique') : effets 'sous-maille' (e.g. convection profonde, turbulence, etc)

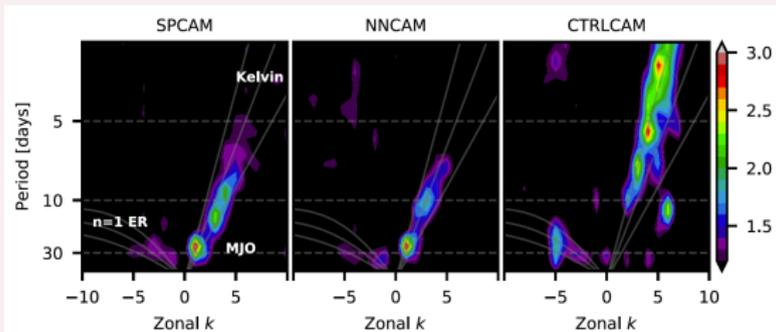
# L'IA et les paramétrisations sous-maille

- évolution des variables d'état  $\mathbf{x}$  dans une maille  $i$

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathcal{D}(\mathbf{x}, t) + \sum_j \varphi_j(\mathbf{x}_i; \theta_j)$$

- ▷  $\mathcal{D}$  ('dynamique') : résolution approchée des équations primitives
- ▷  $\{\varphi_j\}$  ('physique') : effets 'sous-maille' (e.g. convection profonde, turbulence, etc)
- utilisation de l'IA (e.g. [Gentine et al., 2018](#); [Rasp et al., 2018](#); [Brenowitz et Bretherton, 2019](#))

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathcal{D}(\mathbf{x}, t) + \hat{f}_k(\mathbf{x}_i) + \sum_{j \neq k} \varphi_j(\mathbf{x}_i; \theta_j)$$



Spectre de la précipitation équatoriale

modèle apprentissage (SPCAM), modèle 'IA' (NNCCAM) et 'standard' (CTRLCAM) ([Rasp et al., 2018](#))

# L'IA et les paramétrisations sous-maille

- évolution des variables d'état  $\mathbf{x}$  dans une maille  $i$

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathcal{D}(\mathbf{x}, t) + \sum_j \varphi_j(\mathbf{x}_i; \theta_j)$$

- ▷  $\mathcal{D}$  ('dynamique') : résolution approchée des équations primitives
- ▷  $\{\varphi_j\}$  ('physique') : effets 'sous-maille' (e.g. convection profonde, turbulence, etc)
- utilisation de l'IA (e.g. [Gentine et al., 2018](#); [Rasp et al., 2018](#); [Brenowitz et Bretherton, 2019](#))

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathcal{D}(\mathbf{x}, t) + \hat{f}_k(\mathbf{x}_i) + \sum_{j \neq k} \varphi_j(\mathbf{x}_i; \theta_j)$$

## Paramétrisations physiques $\varphi_j(\theta_j)$

'intuition' physique

calibration 'heuristique' a/c de :

- simul. haute résolution / campagnes d'observations  
→ métriques 'a priori',  $\mathcal{L}_j(\theta_j)$
- simulations climatiques  
← métriques 'a posteriori',  $\mathcal{M}(\theta_j)$

## Paramétrisations 'IA' $\hat{f}_k$

'valeur' mathématique

calibration 'objective' a/c de :

- simul. haute résolution  
→ métriques 'a priori',  $\mathcal{L}_k(\hat{f}_k)$

# L'IA et les paramétrisations sous-maille

- évolution des variables d'état  $\mathbf{x}$  dans une maille  $i$

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathcal{D}(\mathbf{x}, t) + \sum_j \varphi_j(\mathbf{x}_i; \theta_j)$$

- ▷  $\mathcal{D}$  ('dynamique') : résolution approchée des équations primitives
- ▷  $\{\varphi_j\}$  ('physique') : effets 'sous-maille' (e.g. convection profonde, turbulence, etc)
- utilisation de l'IA (e.g. [Gentine et al., 2018](#); [Rasp et al., 2018](#); [Brenowitz et Bretherton, 2019](#))

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathcal{D}(\mathbf{x}, t) + \hat{f}_k(\mathbf{x}_i) + \sum_{j \neq k} \varphi_j(\mathbf{x}_i; \theta_j)$$

## Paramétrisations physiques $\varphi_j(\theta_j)$

'intuition' physique

calibration 'heuristique' a/c de :

- simul. haute résolution / campagnes d'observations  
→ métriques 'a priori',  $\mathcal{L}_j(\theta_j)$
- simulations climatiques  
← métriques 'a posteriori',  $\mathcal{M}(\theta_j)$

## Paramétrisations 'IA' $\hat{f}_k$

'valeur' mathématique

calibration 'objective' a/c de :

- simul. haute résolution  
→ métriques 'a priori',  $\mathcal{L}_k(\hat{f}_k)$

- problématique

- ▷ les  $\hat{f}_k$  sont 'sans filet' (ni 'physique', ni ←  $\mathcal{M}$ )
- ▷ interactions avec  $\mathcal{D}$  ou autres  $\varphi_j$  → biais sur  $\mathcal{M}$ , voire instabilités numériques
- ▷ étude dans un cadre simplifié : [Balogh et al., 2021](#); [Balogh et al., 2022](#), *soumis*

# Le modèle de Lorenz (1963)

- ▷ 3 variables :  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$
- ▷ 3 paramètres :  $\theta = (\rho, \sigma, \beta)$
- ▷ 3 équations :  $\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \theta)$

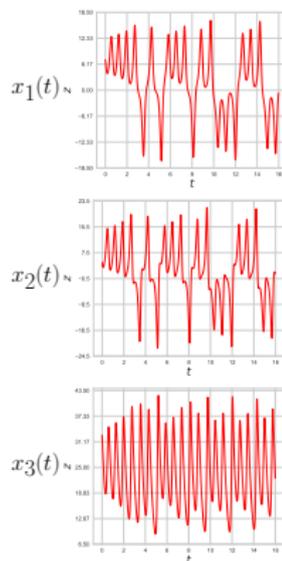
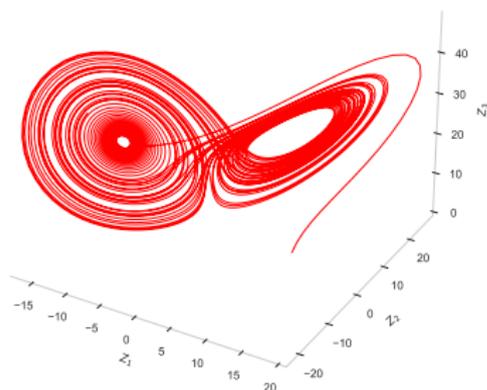
$$\dot{x}_1 = \sigma(x_2 - x_1)$$

$$\dot{x}_2 = x_1(\rho - x_3) - x_2$$

$$\dot{x}_3 = x_1x_2 - \beta x_3 + x_1$$

# Le modèle de Lorenz (1963)

- ▷ 3 variables :  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$
- ▷ 3 paramètres :  $\theta = (\rho, \sigma, \beta)$
- ▷ 3 équations :  $\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \theta)$
- ▷ 2 'ailes de papillon'



Exemples de trajectoires issues du système d'équations de Lorenz (1963); Balogh et al., 2021

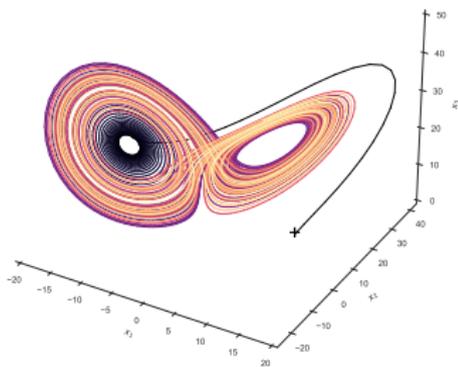
- ▷ pour certaines valeurs de  $\theta$ , dont la plus connue :  $\theta_0 = (28, 10, 8/3)$

# De l'IA dans Lorenz (1963)

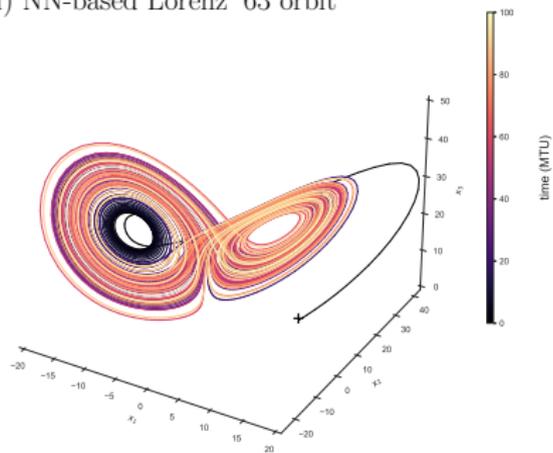
- Est-ce que je peux remplacer  $f$  par un réseau de neurones  $\hat{f}$ ?
  - ▷ Oui, avec un échantillon d'apprentissage construit à partir d'une orbite/trajectoire

$$[\mathbf{x}^{orb}] = \{(\mathbf{x}(t_i), f(\mathbf{x}(t_i)))\}_{i=1..N}$$

(i) Lorenz '63 orbit



(ii) NN-based Lorenz '63 orbit



Exemples de trajectoires : (gauche) intégration du système d'équations de Lorenz (1963) et (droite) intégration de  $\hat{f}$  (Balogh et al., 2021)

→ Lorenz'63 trop 'simple' pour mettre en évidence les problèmes d'instabilités

# De l'IA 'dans le noir' (Balogh et al. 2021)

- On 'plonge' le système de Lorenz dans un espace de plus grande dimension ( $d > 3$ )

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= \sigma(z_2 - z_1) \\ \dot{z}_2 &= z_1(\rho - z_3) - z_2 \\ \dot{z}_3 &= z_1 z_2 - \beta z_3 + z_1 \\ \dot{z}_j &= -z_j, \quad \forall j > 3\end{aligned}$$

- On 'mélange' : on applique une matrice de rotation, tirée aléatoirement *une fois pour toutes*

$$\mathbf{x}(t) = P\mathbf{z}(t)$$

→ 'nouveau' système dynamique ('embedded' Lorenz model)

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \theta); \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$$

# De l'IA 'dans le noir' (Balogh et al. 2021)

→ 'nouveau' système dynamique ('embedded' Lorenz model)

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \theta) ; \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$$

→ de nouveau,

▷ apprentissage à partir d'une trajectoire  $[\mathbf{x}^{orb}] = \{(\mathbf{x}(t_i), f(\mathbf{x}(t_i)))\}_{i=1..N}$

▷ remplacement de  $f$  par  $\hat{f}_{orb}$

# De l'IA 'dans le noir' (Balogh et al. 2021)

→ 'nouveau' système dynamique ('embedded' Lorenz model)

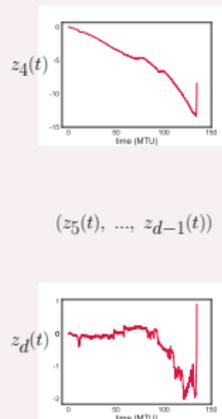
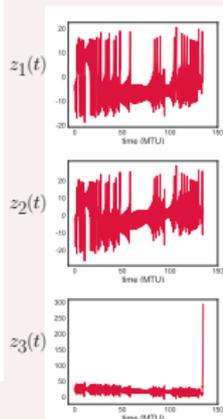
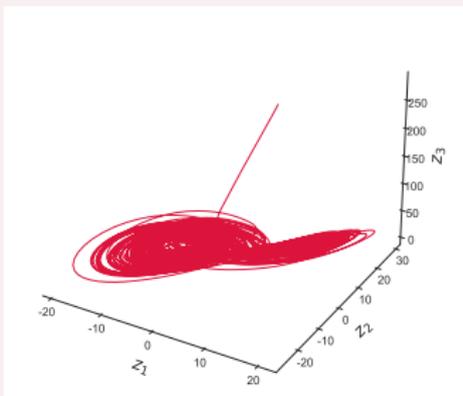
$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \theta) ; \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$$

→ de nouveau,

▷ apprentissage à partir d'une trajectoire  $[\mathbf{x}^{orb}] = \{(\mathbf{x}(t_i), f(\mathbf{x}(t_i)))\}_{i=1..N}$

▷ remplacement de  $f$  par  $\hat{f}_{orb}$

▷ un exemple de trajectoire



$(z_5(t), \dots, z_{d-1}(t))$

(figure B. Balogh)

# De l'IA 'dans le noir' (Balogh et al. 2021)

→ 'nouveau' système dynamique ('embedded' Lorenz model)

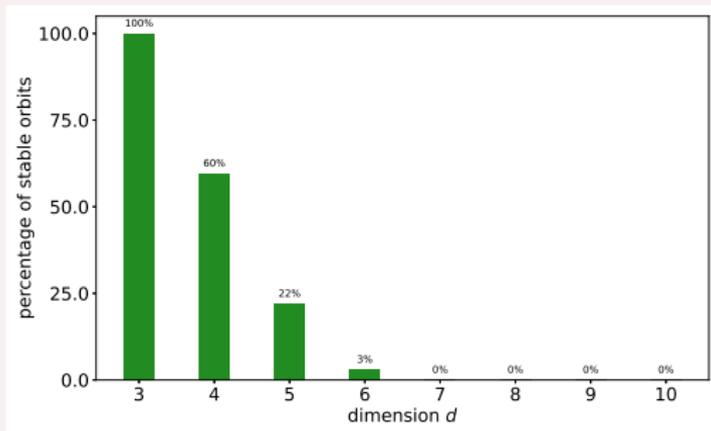
$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \theta) ; \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$$

→ de nouveau,

▷ apprentissage à partir d'une trajectoire  $[\mathbf{x}^{orb}] = \{(\mathbf{x}(t_i), f(\mathbf{x}(t_i)))\}_{i=1..N}$

▷ remplacement de  $f$  par  $\hat{f}_{orb}$

▷ pourcentage d'orbites 'stables' en fonction de  $d$



(figure B. Balogh)

# De l'IA 'dans le noir' (Balogh et al. 2021)

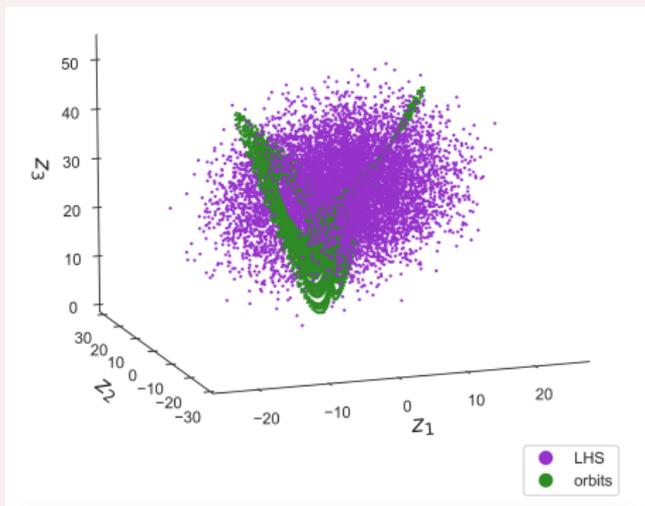
→ 'nouveau' système dynamique ('embedded' Lorenz model)

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \theta) ; \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$$

→ maintenant,

▷ apprentissage à partir d'un hypercube latin  $[\mathbf{x}^{\text{LHS}}] = \{(\mathbf{x}_k, f(\mathbf{x}_k))\}_{k=1..N}$

▷ remplacement de  $f$  par  $\hat{f}_{\text{LHS}}$



(figure B. Balogh)

# De l'IA 'dans le noir' (Balogh et al. 2021)

→ 'nouveau' système dynamique ('embedded' Lorenz model)

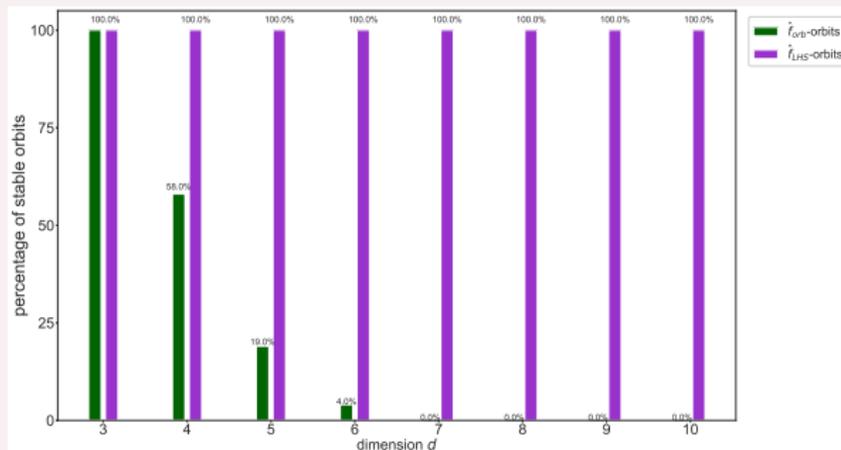
$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \theta) ; \mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$$

→ maintenant,

▷ apprentissage à partir d'un hypercube latin  $[\mathbf{x}^{\text{LHS}}] = \{(\mathbf{x}_k, f(\mathbf{x}_k))\}_{k=1..N}$

▷ remplacement de  $f$  par  $\hat{f}_{\text{LHS}}$

▷ pourcentage d'orbites 'stables' en fonction de  $d$  :  $\hat{f}_{\text{LHS}}$  vs  $\hat{f}_{\text{orb}}$



(Balogh et al. 2021)

# De l'IA 'dans le brouillard' (*Balogh et al., 2022*)

- ▷ Lorenz (1963) :  $\dot{\mathbf{x}} = (f_1(\mathbf{x}, \sigma), f_2(\mathbf{x}, \rho), f_3(\mathbf{x}, \beta))$  et le réel =  $(\sigma_0, \rho_0, \beta_0)$
- ▷ Remplacement de  $f_3$  uniquement
- ▷ Dans un modèle 'biaisé' :  $f_2$  mal 'représentée'  $\Leftrightarrow \rho \in \{\rho_b \neq \rho_0\}$

# De l'IA 'dans le brouillard' (*Balogh et al., 2022*)

- ▷ Lorenz (1963) :  $\dot{\mathbf{x}} = (f_1(\mathbf{x}, \sigma), f_2(\mathbf{x}, \rho), f_3(\mathbf{x}, \beta))$  et le réel =  $(\sigma_0, \rho_0, \beta_0)$
- ▷ Remplacement de  $f_3$  uniquement
- ▷ Dans un modèle 'biaisé' :  $f_2$  mal 'représentée'  $\Leftrightarrow \rho \in \{\rho_b \neq \rho_0\}$

## Méthode *classique*

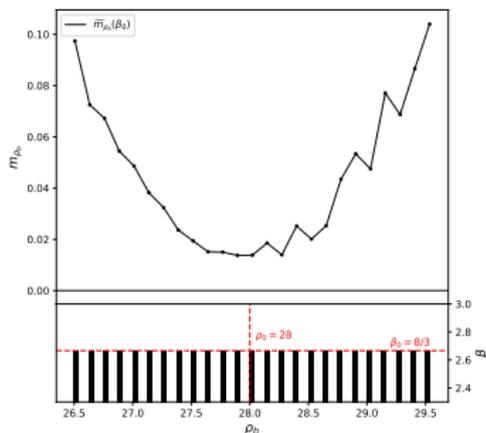
- échantillon d'apprentissage :  $[\mathbf{x}^{\text{LHS}}] = \{(\mathbf{x}_k, f_3(\mathbf{x}_k, \beta_0))\}_{k=1..N}$
- estimation de  $\hat{f}_3(\mathbf{x})$
- pour différents  $\rho_b$ , évaluation des trajectoires du 'modèle'  $(f_1(\mathbf{x}, \sigma_0), f_2(\mathbf{x}, \rho_b), \hat{f}_3(\mathbf{x}))$

# De l'IA 'dans le brouillard' (*Balogh et al., 2022*)

- ▷ Lorenz (1963) :  $\dot{\mathbf{x}} = (f_1(\mathbf{x}, \sigma), f_2(\mathbf{x}, \rho), f_3(\mathbf{x}, \beta))$  et le réel =  $(\sigma_0, \rho_0, \beta_0)$
- ▷ Remplacement de  $f_3$  uniquement
- ▷ Dans un modèle 'biaisé' :  $f_2$  mal 'représentée'  $\Leftrightarrow \rho \in \{\rho_b \neq \rho_0\}$

## Méthode *classique*

- échantillon d'apprentissage :  $[\mathbf{x}^{\text{LHS}}] = \{(\mathbf{x}_k, f_3(\mathbf{x}_k, \beta_0))\}_{k=1..N}$
- estimation de  $\hat{f}_3(\mathbf{x})$
- pour différents  $\rho_b$ , évaluation des trajectoires du 'modèle'  $(f_1(\mathbf{x}, \sigma_0), f_2(\mathbf{x}, \rho_b), \hat{f}_3(\mathbf{x}))$



# De l'IA 'dans le brouillard' (*Balogh et al., 2022*)

- ▷ Lorenz (1963) :  $\dot{\mathbf{x}} = (f_1(\mathbf{x}, \sigma), f_2(\mathbf{x}, \rho), f_3(\mathbf{x}, \beta))$  et le réel =  $(\sigma_0, \rho_0, \beta_0)$
- ▷ Remplacement de  $f_3$  uniquement
- ▷ Dans un modèle 'biaisé' :  $f_2$  mal 'représentée'  $\Leftrightarrow \rho \in \{\rho_b \neq \rho_0\}$

## Méthode *classique*

- échantillon d'apprentissage :  $[\mathbf{x}^{\text{LHS}}] = \{(\mathbf{x}_k, f_3(\mathbf{x}_k, \beta_0))\}_{k=1..N}$
- estimation de  $\hat{f}_3(\mathbf{x})$
- pour différents  $\rho_b$ , évaluation des trajectoires du 'modèle'  $(f_1(\mathbf{x}, \sigma_0), f_2(\mathbf{x}, \rho_b), \hat{f}_3(\mathbf{x}))$

## Méthode *Balogh et al., 2022*

- ▷ idée : apprendre aussi la dépendance à  $\beta$ ,  $\hat{f}_3(\mathbf{x}, \beta)$  !

# De l'IA 'dans le brouillard' (*Balogh et al., 2022*)

- ▷ Lorenz (1963) :  $\dot{\mathbf{x}} = (f_1(\mathbf{x}, \sigma), f_2(\mathbf{x}, \rho), f_3(\mathbf{x}, \beta))$  et le réel =  $(\sigma_0, \rho_0, \beta_0)$
- ▷ Remplacement de  $f_3$  uniquement
- ▷ Dans un modèle 'biaisé' :  $f_2$  mal 'représentée'  $\Leftrightarrow \rho \in \{\rho_b \neq \rho_0\}$

## Méthode *classique*

- échantillon d'apprentissage :  $[\mathbf{x}^{\text{LHS}}] = \{(\mathbf{x}_k, f_3(\mathbf{x}_k, \beta_0))\}_{k=1..N}$
- estimation de  $\hat{f}_3(\mathbf{x})$
- pour différents  $\rho_b$ , évaluation des trajectoires du 'modèle'  $(f_1(\mathbf{x}, \sigma_0), f_2(\mathbf{x}, \rho_b), \hat{f}_3(\mathbf{x}))$

## Méthode *Balogh et al., 2022*

- échantillon d'apprentissage :  $[\mathbf{x}^{\text{LHS}}] = \{(\mathbf{x}_k, \beta_k), f_3(\mathbf{x}_k, \beta_k)\}_{k=1..N}$
- estimation de  $\hat{f}_3(\mathbf{x}, \beta)$
- optimisation de la valeur de  $\beta$ , i.e., pour chaque  $\rho_b$ , on calcule les trajectoires du système  $(f_1(\mathbf{x}, \sigma_0), f_2(\mathbf{x}, \rho_b), \hat{f}_3(\mathbf{x}, \beta))$  pour différentes valeurs de  $\beta$  : on choisit celle qui optimise la valeur de  $\mathcal{M}$  :  $\beta^* \equiv \beta(\rho_b)$ .
- pour différents  $\rho_b$ , évaluation des trajectoires du 'modèle'  $(f_1(\mathbf{x}, \sigma_0), f_2(\mathbf{x}, \rho_b), \hat{f}_3(\mathbf{x}, \beta^*))$

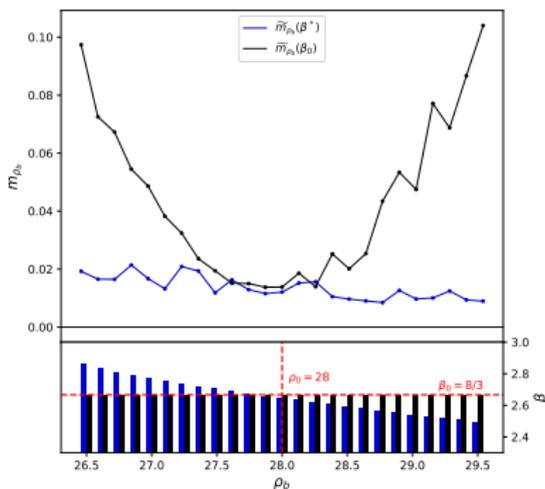
# De l'IA 'dans le brouillard' (*Balogh et al., 2022*)

## Méthode classique

- pour différents  $\rho_b$ , évaluation des trajectoires du 'modèle' ( $f_1(\mathbf{x}, \sigma_0)$ ,  $f_2(\mathbf{x}, \rho_b)$ ,  $\hat{f}_3(\mathbf{x})$ )

## Méthode *Balogh et al., 2022*

- pour différents  $\rho_b$ , évaluation des trajectoires du 'modèle' ( $f_1(\mathbf{x}, \sigma_0)$ ,  $f_2(\mathbf{x}, \rho_b)$ ,  $\hat{f}_3(\mathbf{x}, \beta^*)$ )



# L'IA et les paramétrisations sous-maille

- Remplacement de paramétrisations physiques par des NN
  - instabilités numériques & biais dans simulations climatiques (e.g. [Brenowitz et Bretherton, 2019](#))
- reproduction des problèmes avec des modèles 'jouet'
- solutions possibles (dans ce cadre simple!)
  - ▷ conception 'astucieuse' de l'échantillon d'apprentissage ([Balogh et al., 2021](#))
  - ▷ autoriser une calibration a posteriori du NN ([Balogh et al., 2022, soumis](#))
- dans le cas réel ?
  - ▷ ajouter des 'filets de sécurité' : contraintes de conservation (e.g. [Beucler et al., 2019](#))
  - ▷ ajouter de l'*intelligence* : 'hybridation' avec de la physique 'bien comprise' (e.g. [Ling et al., 2016](#))

# Conclusion et perspectives

# Conclusion et perspectives

→ Poursuivre le développement des modèles climatiques

- Enjeux

- 1. S'adapter aux 'nouvelles' architectures de calcul
- 2. Éviter la complexification excessive
- 3. Mieux représenter les nuages (et autres phénomènes mal simulés)

# Conclusion et perspectives

→ Poursuivre le développement des modèles climatiques

- Enjeux

- 1. S'adapter aux 'nouvelles' architectures de calcul
- 2. Éviter la complexification excessive
- 3. Mieux représenter les nuages (et autres phénomènes mal simulés)

- Pistes

(1 & 2) → restructuration des codes : efficacité, portabilité (e.g. [Schultess, 2015](#) ; [Schär et al. 2020](#))

# Conclusion et perspectives

→ Poursuivre le développement des modèles climatiques

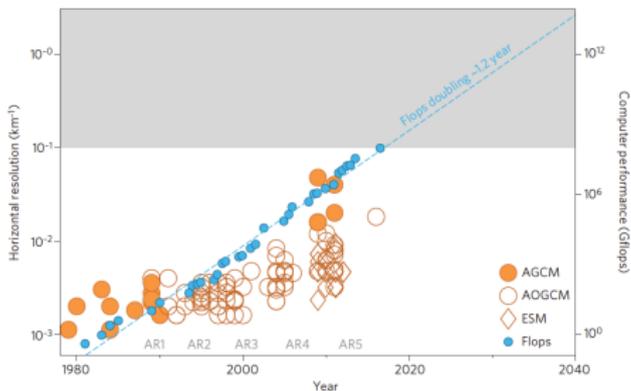
- Enjeux

- 1. S'adapter aux 'nouvelles' architectures de calcul
- 2. Éviter la complexification excessive
- 3. Mieux représenter les nuages (et autres phénomènes mal simulés)

- Pistes

(1 & 2) → restructuration des codes : efficacité, portabilité (e.g. [Schultess, 2015](#) ; [Schär et al. 2020](#))

(2 & 3) → 'favoriser' l'atmosphère/la très haute résolution globale (e.g. [Stevens et al. 2019](#))



Évolution de la résolution horizontale des principaux modèles de climat ([Schneider et al., 2017](#))

# Conclusion et perspectives

→ Poursuivre le développement des modèles climatiques

- Enjeux

- 1. S'adapter aux 'nouvelles' architectures de calcul
- 2. Éviter la complexification excessive
- 3. Mieux représenter les nuages (et autres phénomènes mal simulés)

- Pistes

(1 & 2) → restructuration des codes : efficacité, portabilité (e.g. [Schultess, 2015](#) ; [Schär et al. 2020](#))

(2 & 3) → 'favoriser' l'atmosphère/la très haute résolution globale (e.g. [Stevens et al. 2019](#))

(2 & 3) → renforcer les passerelles entre les cadres d'étude académiques (e.g. [Maher et al., 2019](#))

# Conclusion et perspectives

→ Poursuivre le développement des modèles climatiques

- Enjeux

- 1. S'adapter aux 'nouvelles' architectures de calcul
- 2. Éviter la complexification excessive
- 3. Mieux représenter les nuages (et autres phénomènes mal simulés)

- Pistes

(1 & 2) → restructuration des codes : efficacité, portabilité (e.g. [Schultess, 2015](#) ; [Schär et al. 2020](#))

(2 & 3) → 'favoriser' l'atmosphère/la très haute résolution globale (e.g. [Stevens et al. 2019](#))

(2 & 3) → renforcer les passerelles entre les cadres d'étude académiques (e.g. [Maher et al., 2019](#))

(1, 2 & 3?) → utilisation de l'intelligence artificielle ?

→ utilisation des ressources de calcul (et humaines)

→ analyse de la très haute résolution

→ hybridation : mise en place de paramétrisations simplifiés ('squelette physique')