



La mesure du déséquilibre énergétique planétaire par géodésie spatiale pour contraindre la sensibilité climatique et les projections de hausse du niveau de la mer

Jonathan CHENAL^(b,d)

Benoît MEYSSIGNAC^(a,c), Alejandro BLAZQUEZ^(a,c), Robin GUILLAUME-CASTEL^(a)

^(a) : LEGOS, UMR 5566 (CNES, CNRS, IRD, UPS), Toulouse, France

^(b) : anciennement LEGOS, UMR 5566 (CNES, CNRS, IRD, UPS), Toulouse, et ENPC, Marne-la-Vallée, France

^(c) : CNES, Toulouse, France

^(d) : IGN, Toulouse, Saint-Mandé, France

Sensibilité climatique d'équilibre

Équation du bilan d'énergie planétaire

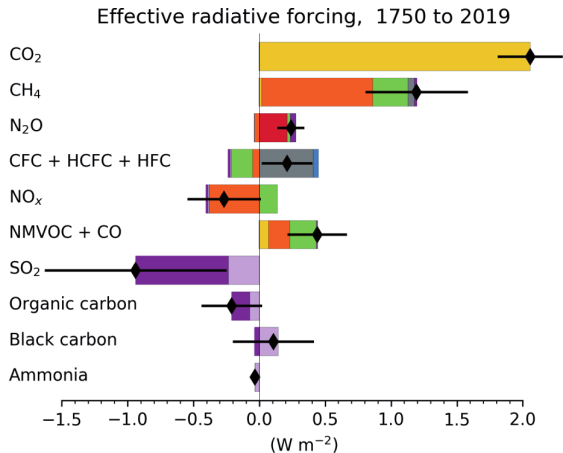
$$\left[\begin{array}{lcl} N & = & F + R \quad (W \cdot m^{-2}) \\ \text{ray. entrant} - \text{ray. sortant} & = & \text{forçage rad.} + \text{réponse rad.} \end{array} \right]_{\text{TOA}}$$

[CHARNEY *et al.*, 1979; RAMANATHAN, 1987]

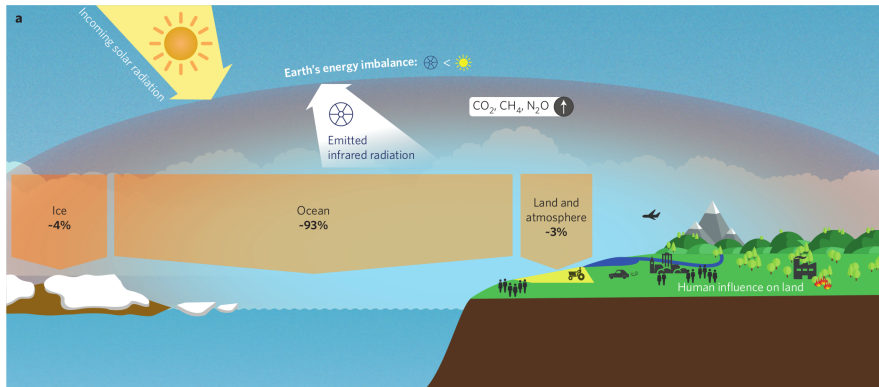
TOA : *Top of atmosphere*

- N : déséquilibre énergétique
- F : forçage radiatif
- R : réponse radiative de la Terre

Chacun de ces trois termes détaillé dans les prochaines diapositives...

Forçage radiatif F : gaz à effet de serre et aérosols[ARIAS *et al.*, 2021] (IPCC AR6 TS)Total (2019 vs 1750) : 2.72 [1.96 ; 3.48] W·m⁻² (5 ; 95%)

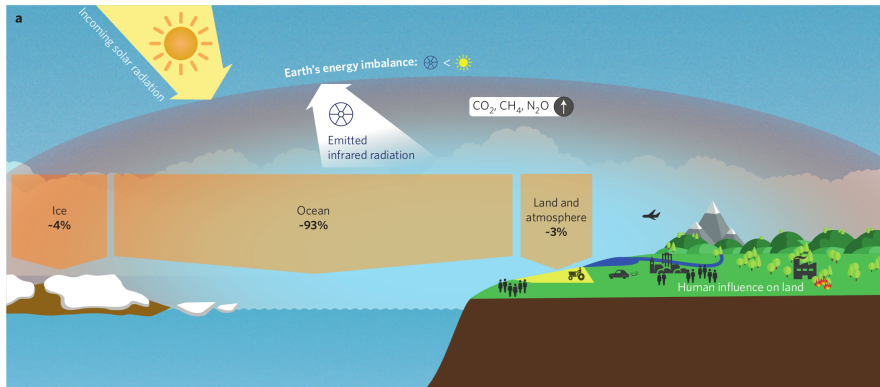
Déséquilibre énergétique planétaire *N*



[VON SCHUCKMANN *et al.*, 2016]

- ~ 91% absorbé par l'océan global
- ~ 4% absorbé par les glaciers et calottes polaires

Déséquilibre énergétique planétaire *N*



[VON SCHUCKMANN *et al.*, 2016]

- ~ 91% absorbé par l'océan global
- ~ 4% absorbé par les glaciers et calottes polaires

95% du DÉSÉQUILIBRE ÉNERGÉTIQUE



ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER

[CHURCH *et al.*, 2011 ; LEVITUS *et al.*, 2012 ; MEYSSIGNAC *et al.*, 2019 ; VON SCHUCKMANN *et al.*, 2020 ; ARIAS *et al.*, 2021]

Réponse radiative de la Terre R : transformation de la surface de la Terre pour rétablir l'équilibre

Hypothèse principale : linéarité avec la température globale moyenne de surface T

[BUDYKO, 1968 ; DICKINSON *et al.*, 1982 ; RAMANATHAN, 1988]

$$R = \lambda T$$

λ : paramètre de rétroaction climatique

Réponse radiative de la Terre R : transformation de la surface de la Terre pour rétablir l'équilibre

Hypothèse principale : linéarité avec la température globale moyenne de surface T

[BUDYKO, 1968 ; DICKINSON *et al.*, 1982 ; RAMANATHAN, 1988]

$$R = \lambda T$$

λ : paramètre de rétroaction climatique

Modèle classique du bilan d'énergie

$$N = F + \lambda T$$

Sensibilité climatique d'équilibre (*ECS*)

[ARRHENIUS, 1896 ; MANABE & WETHERALD, 1967 ; CHARNEY *et al.*, 1979]

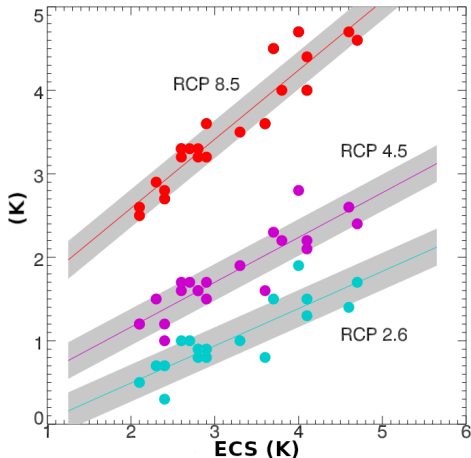
$$ECS = -\frac{F_{2x}}{\lambda}$$

Métrique fondamentale de l'amplitude du changement climatique et des projections

Sensibilité climatique d'équilibre (*ECS*)[ARRHENIUS, 1896 ; MANABE & WETHERALD, 1967 ; CHARNEY *et al.*, 1979]

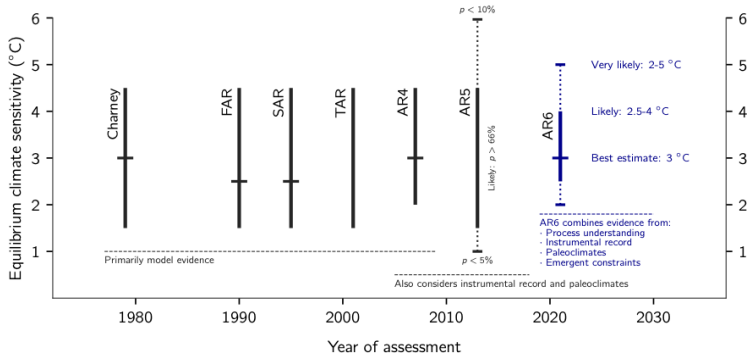
$$ECS = -\frac{F_{2x}}{\lambda}$$

Métrique fondamentale de l'amplitude du changement climatique et des projections



$T(2100) \propto ECS$ pour trois scénarios socio-économiques du GIEC

Adapté de [SHERWOOD *et al.*, 2020]

Problem : ECS est encore très incertaine !**a) Evolution of equilibrium climate sensitivity assessments from Charney to AR6****1979-2013 :**
 $1.5 \leq ECS \leq 4.5 \text{ K (likely)}$

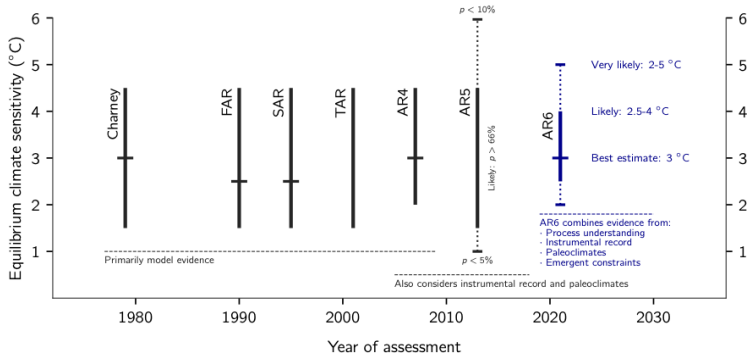
 [CHARNEY *et al.*, 1979 ; IPCC, 2013]
Recently :
 $2.3 \leq ECS \leq 4.5 \text{ K (likely)}$ [SHERWOOD *et al.*, 2020]

 $2.5 \leq ECS \leq 4.0 \text{ K (likely)}$ [ARIAS *et al.*, 2021]

 $2.0 \leq ECS \leq 5.0 \text{ K (very likely)}$ [ARIAS *et al.*, 2021]

Problem : ECS est encore très incertaine !

a) Evolution of equilibrium climate sensitivity assessments from Charney to AR6

**1979-2013 :**
 $1.5 \leq ECS \leq 4.5$ K (likely)

 [CHARNEY *et al.*, 1979; IPCC, 2013]
Recently :
 $2.3 \leq ECS \leq 4.5$ K (likely) [SHERWOOD *et al.*, 2020]

 $2.5 \leq ECS \leq 4.0$ K (likely) [ARIAS *et al.*, 2021]

 $2.0 \leq ECS \leq 5.0$ K (very likely) [ARIAS *et al.*, 2021]
Incohérences entre méthodes malgré des tentatives récentes de réconciliation entre méthodes
 [ANDREWS *et al.*, 2018; SHERWOOD *et al.*, 2020]

- estimations observationnelles : valeurs basse
- estimations des modèles de climat : valeurs hautes

Clé : $\lambda(t)$ non constant ! [SENIOR & MITCHELL, 2000; ARMOUR *et al.*, 2013; GREGORY & ANDREWS, 2016]

- dépend de la température globale moyenne elle-même
- dépend de la variabilité climatique intrinsèque
- dépend des agents forçants et de leurs variations temporelles

⇒ effets des structures spatiales du réchauffement sur les nuages bas marins : « **pattern effect** »

Clé : $\lambda(t)$ non constant ! [SENIOR & MITCHELL, 2000; ARMOUR *et al.*, 2013; GREGORY & ANDREWS, 2016]

- dépend de la température globale moyenne elle-même
- dépend de la variabilité climatique intrinsèque
- dépend des agents forçants et de leurs variations temporelles

⇒ effets des structures spatiales du réchauffement sur les nuages bas marins : « pattern effect »

Clé : $\lambda(t)$ non constant ! [SENIOR & MITCHELL, 2000; ARMOUR *et al.*, 2013; GREGORY & ANDREWS, 2016]

- dépend de la température globale moyenne elle-même
- dépend de la variabilité climatique intrinsèque
- dépend des agents forçants et de leurs variations temporelles

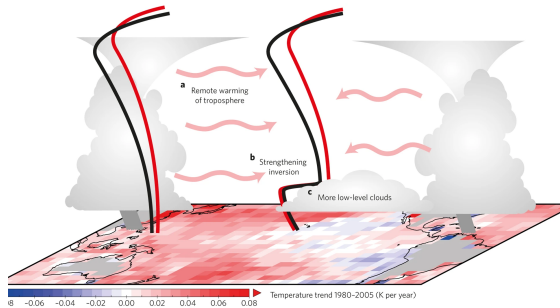
⇒ effets des structures spatiales du réchauffement sur les nuages bas marins : « pattern effect »

Clé : $\lambda(t)$ non constant ! [SENIOR & MITCHELL, 2000; ARMOUR *et al.*, 2013; GREGORY & ANDREWS, 2016]

- dépend de la température globale moyenne elle-même
- dépend de la variabilité climatique intrinsèque
- dépend des agents forçants et de leurs variations temporelles

⇒ effets des structures spatiales du réchauffement sur les nuages bas marins : « **pattern effect** »

[HANSEN *et al.*, 2005; MARVEL *et al.*, 2016; ZHOU *et al.*, 2016; ANDREWS *et al.*, 2018; ZHOU *et al.*, 2021]



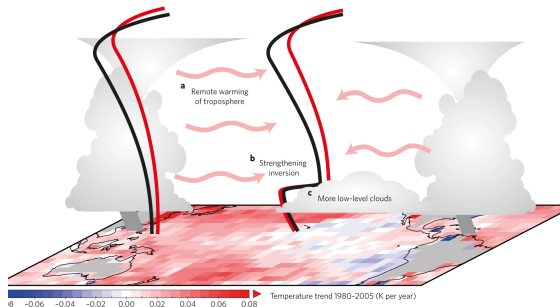
[MAURITSEN, 2016]

Clé : $\lambda(t)$ non constant ! [SENIOR & MITCHELL, 2000; ARMOUR *et al.*, 2013; GREGORY & ANDREWS, 2016]

- dépend de la température globale moyenne elle-même
- dépend de la variabilité climatique intrinsèque
- dépend des agents forçants et de leurs variations temporelles

⇒ effets des structures spatiales du réchauffement sur les nuages bas marins : « **pattern effect** »

[HANSEN *et al.*, 2005; MARVEL *et al.*, 2016; ZHOU *et al.*, 2016; ANDREWS *et al.*, 2018; ZHOU *et al.*, 2021]



[MAURITSEN, 2016]

L'estimation observationnelle de la sensibilité climatique est nécessairement incertaine et ne reflète qu'une sensibilité temporelle moyenne calculée en régime transitoire avec tous les agents forçants
sensibilité climatique effective observationnelle (obseffCS)
≠ sensibilité climatique d'équilibre « canonique » (CO2effCS)

⇒ **Besoin de modéliser le biais de obseffCS → CO2effCS**

Méthodes, données, résultats

- forçages radiatifs F : GHG [SHERWOOD *et al.*, 2020], aérosols [BELLOUIN *et al.*, 2020]
 $F_{2\times}$ from [SMITH *et al.*, 2020]
- température de surface T [COWTAN & WAY, 2014; RICHARDSON *et al.*, 2016]
- déséquilibre énergétique N :
 - ▶ mesure radiative directe : CERES [LOEB *et al.*, 2018];

Méthodes, données, résultats

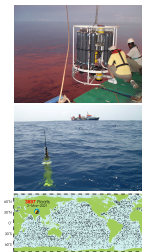
- forçages radiatifs F : GHG [SHERWOOD *et al.*, 2020], aérosols [BELLOUIN *et al.*, 2020]
 $F_{2\times}$ from [SMITH *et al.*, 2020]
- température de surface T [COWTAN & WAY, 2014; RICHARDSON *et al.*, 2016]
- déséquilibre énergétique N :
 - ▶ mesure radiative directe : CERES [LOEB *et al.*, 2018];
 - ▶ contenu de chaleur de l'océan « traditionnel » (T/S)

Méthodes, données, résultats

- forçages radiatifs F : GHG [SHERWOOD *et al.*, 2020], aérosols [BELLOUIN *et al.*, 2020]
 $F_{2\times}$ from [SMITH *et al.*, 2020]
- température de surface T [COWTAN & WAY, 2014; RICHARDSON *et al.*, 2016]
- déséquilibre énergétique N :
 - ▶ mesure radiative directe : CERES [LOEB *et al.*, 2018];
 - ▶ contenu de chaleur de l'océan « traditionnel » (T/S)
 - a) *in situ* global (Argo) : 2005-2018 [LOEB *et al.*, 2021]
 - b) *in situ* global (BT, CTD, gliders, mammifères marins, etc. + Argo) (1971-2018) ensemble de 5 solutions : [GOURETSKI & KOLTERMANN, 2007; LEVITUS *et al.*, 2009; LEVITUS *et al.*, 2012; GOOD *et al.*, 2013; CHENG *et al.*, 2017; ISHII *et al.*, 2017]
 - ▶ contenu de chaleur de l'océan par géodésie spatiale [HAKUBA *et al.*, 2021; MARTI *et al.*, 2022]

$$OHC = \frac{1}{\epsilon} (\Delta SL_{Alti} - \Delta SL_{Grace})$$

$\epsilon \approx 0,145 \text{ m}\cdot\text{J}^{-1}$: efficacité expansive de la chaleur (EEH)

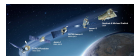
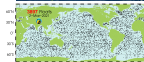
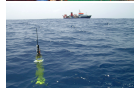
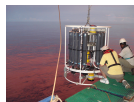


Méthodes, données, résultats

- forçages radiatifs F : GHG [SHERWOOD *et al.*, 2020], aérosols [BELLOUIN *et al.*, 2020]
 $F_{2\times}$ from [SMITH *et al.*, 2020]
- température de surface T [COWTAN & WAY, 2014; RICHARDSON *et al.*, 2016]
- déséquilibre énergétique N :
 - ▶ mesure radiative directe : CERES [LOEB *et al.*, 2018];
 - ▶ contenu de chaleur de l'océan « traditionnel » (T/S)
 - a) *in situ* global (Argo) : 2005-2018 [LOEB *et al.*, 2021]
 - b) *in situ* global (BT, CTD, gliders, mammifères marins, etc. + Argo) (1971-2018) ensemble de 5 solutions : [GOURETSKI & KOLTERMANN, 2007; LEVITUS *et al.*, 2009; LEVITUS *et al.*, 2012; GOOD *et al.*, 2013; CHENG *et al.*, 2017; ISHII *et al.*, 2017]
 - ▶ **contenu de chaleur de l'océan par géodésie spatiale** [HAKUBA *et al.*, 2021; MARTI *et al.*, 2022]

$$OHC = \frac{1}{\epsilon} (\Delta SL_{\text{Alti}} - \Delta SL_{\text{Grace}})$$

$\epsilon \approx 0,145 \text{ m}\cdot\text{J}^{-1}$: efficacité expansive de la chaleur (EEH)



Méthodes, données, résultats

- forçages radiatifs F : GHG [SHERWOOD *et al.*, 2020], aérosols [BELLOUIN *et al.*, 2020]
 $F_{2\times}$ from [SMITH *et al.*, 2020]
- température de surface T [COWTAN & WAY, 2014; RICHARDSON *et al.*, 2016]
- déséquilibre énergétique N :
 - ▶ mesure radiative directe : CERES [LOEB *et al.*, 2018];
 - ▶ contenu de chaleur de l'océan « traditionnel » (T/S)
 - a) *in situ* global (Argo) : 2005-2018 [LOEB *et al.*, 2021]
 - b) *in situ* global (BT, CTD, gliders, mammifères marins, etc. + Argo) (1971-2018) ensemble de 5 solutions : [GOURETSKI & KOLTERMANN, 2007; LEVITUS *et al.*, 2009; LEVITUS *et al.*, 2012; GOOD *et al.*, 2013; CHENG *et al.*, 2017; ISHII *et al.*, 2017]
 - ▶ contenu de chaleur de l'océan par géodésie spatiale [HAKUBA *et al.*, 2021; MARTI *et al.*, 2022]

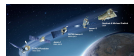
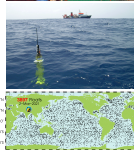
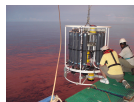
$$OHC = \frac{1}{\epsilon} (\Delta SL_{Alti} - \Delta SL_{Grace})$$

$\epsilon \approx 0,145 \text{ m}\cdot\text{J}^{-1}$: efficacité expansive de la chaleur (EEH)

Déséquilibre énergétique planétaire (EEI) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

$$N = \frac{1}{\beta} \frac{1}{S_{TOA}} \frac{dOHC}{dt}$$

$\beta \approx 0,93$: fraction de EEI absorbé par l'océan
 $S_{TOA} = 4\pi r_{TOA}^2$: surface de la sphère TOA

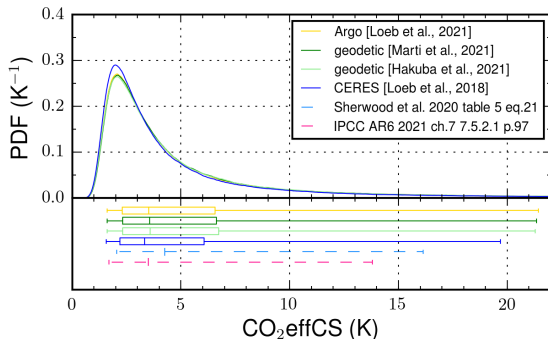


EEI

CO₂effCS

Median [5%;95%] (K)

Argo [LOEB <i>et al.</i> , 2021]	(2005-2018)	3.5 [1.6 ; 21.4]
Géodésique [MARTI <i>et al.</i> , 2022]	(2002-2016)	3.6 [1.6 ; 20.8]
Géodésique [HAKUBA <i>et al.</i> , 2021]	(2005-2015)	3.6 [1.6 ; 21.3]
CERES [LOEB <i>et al.</i> , 2018]	(2006-2018)	3.3 [1.5 ; 19.7]
[SHERWOOD <i>et al.</i> , 2020]	(2006-2018)	4.3 [2.0 ; 16.1]
IPCC AR6 [FORSTER <i>et al.</i> , 2021]	(2006-2019)	3.5 [1.7 ; 13.8]



Géodésique, Argo, CERES, [SHERWOOD *et al.*, 2020], IPCC AR6 :
état moyen vs 1869-1882

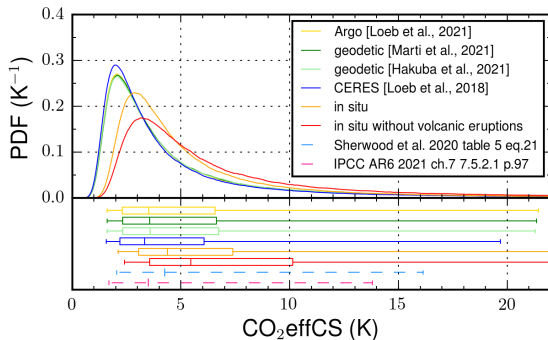
- validation de l'approche par géodésie spatiale (et première estimation de l'ECS par géodésie spatiale)
- avec séries temporelles plus longues : différences d'états vs régression
- contribution à la réconciliation entre estimations des observations et des modèles

EEI

CO₂effCS

Median [5%;95%] (K)

Argo [LOEB <i>et al.</i> , 2021]	(2005-2018)	3.5 [1.6 ; 21.4]
Géodésique [MARTI <i>et al.</i> , 2022]	(2002-2016)	3.6 [1.6 ; 20.8]
Géodésique [HAKUBA <i>et al.</i> , 2021]	(2005-2015)	3.6 [1.6 ; 21.3]
CERES [LOEB <i>et al.</i> , 2018]	(2006-2018)	3.3 [1.5 ; 19.7]
In situ	(1971-2017)	4.4 [2.1 ; 24.5]
In situ (sans éruptions volcaniques)* [CHENAL <i>et al.</i> , 2022]	(1971-2017)	5.4 [2.4 ; 35.6]
[SHERWOOD <i>et al.</i> , 2020]	(2006-2018)	4.3 [2.0 ; 16.1]
IPCC AR6 [FORSTER <i>et al.</i> , 2021]	(2006-2019)	3.5 [1.7 ; 13.8]



Géodésique, Argo, CERES, [SHERWOOD *et al.*, 2020], IPCC AR6 :

état moyen vs 1869-1882

In situ, In situ (sans éruptions volcaniques)* :
régression de $N - F$ par T



El Chichon (1982), Pinatubo (1991)

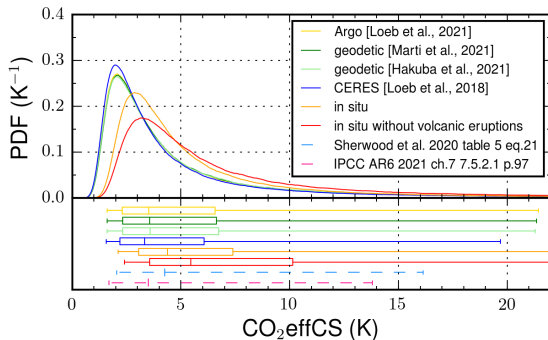
- validation de l'approche par géodésie spatiale (et première estimation de l'ECS par géodésie spatiale)
- avec séries temporelles plus longues : différences d'états vs régression
- contribution à la réconciliation entre estimations des observations et des modèles

EEI

CO₂effCS

Median [5%;95%] (K)

Argo [LOEB <i>et al.</i> , 2021]	(2005-2018)	3.5 [1.6 ; 21.4]
Géodésique [MARTI <i>et al.</i> , 2022]	(2002-2016)	3.6 [1.6 ; 20.8]
Géodésique [HAKUBA <i>et al.</i> , 2021]	(2005-2015)	3.6 [1.6 ; 21.3]
CERES [LOEB <i>et al.</i> , 2018]	(2006-2018)	3.3 [1.5 ; 19.7]
In situ	(1971-2017)	4.4 [2.1 ; 24.5]
In situ (sans éruptions volcaniques)* [CHENAL <i>et al.</i> , 2022]	(1971-2017)	5.4 [2.4 ; 35.6]
[SHERWOOD <i>et al.</i> , 2020]	(2006-2018)	4.3 [2.0 ; 16.1]
IPCC AR6 [FORSTER <i>et al.</i> , 2021]	(2006-2019)	3.5 [1.7 ; 13.8]



Géodésique, Argo, CERES, [SHERWOOD *et al.*, 2020], IPCC AR6 :

état moyen vs 1869-1882

In situ, In situ (sans éruptions volcaniques)* :

régression de $N - F$ par T



El Chichon (1982), Pinatubo (1991)

- validation de l'approche par géodésie spatiale (et première estimation de l'ECS par géodésie spatiale)
- avec séries temporelles plus longues : différences d'états vs régression
- contribution à la réconciliation entre estimations des observations et des modèles

Résultats (2) : influence de l'époque moyenne et de la durée des observations sur l'estimation du paramètre λ

Extension de la solution *in situ* d'EEL solution sur 1957-2017 [MEYSSIGNAC *et al.*, *subm.*] :

- composante thermostérique de la reconstruction de [FREDERIKSE *et al.*, 2020] par GMSL - GMBSL (filtre passe-bas, 15 ans)
- solutions *in situ* (ensemble de 5-solutions + ARANN [BAGNELL & DE VRIES, 2021]) (filtre passe-bas, 10 ans)

Forçage radiatif et température : filtre passe-bas, 10 ans

Résultats (2) : influence de l'époque moyenne et de la durée des observations sur l'estimation du paramètre λ

Extension de la solution *in situ* d'EEL solution sur 1957-2017 [MEYSSIGNAC *et al.*, *subm.*] :

- composante thermostérique de la reconstruction de [FREDERIKSE *et al.*, 2020] par GMSL - GMBSL (filtre passe-bas, 15 ans)
- solutions *in situ* (ensemble de 5-solutions + ARANN [BAGNELL & DE VRIES, 2021]) (filtre passe-bas, 10 ans)

Forçage radiatif et température : filtre passe-bas, 10 ans

**Pour toutes les durées supérieures à 25 ans
et toutes les plages possibles,
régression de $N - F$ par T**

[MEYSSIGNAC *et al.*, *subm.*]

Résultats (2) : influence de l'époque moyenne et de la durée des observations sur l'estimation du paramètre λ

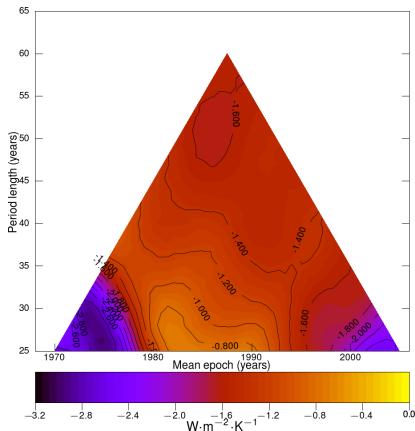
Extension de la solution *in situ* d'EEL solution sur 1957-2017 [MEYSSIGNAC *et al.*, *subm.*] :

- composante thermostérique de la reconstruction de [FREDERIKSE *et al.*, 2020] par GMSL - GMBSL (filtre passe-bas, 15 ans)
- solutions *in situ* (ensemble de 5-solutions + ARANN [BAGNELL & DE VRIES, 2021]) (filtre passe-bas, 10 ans)

Forçage radiatif et température : filtre passe-bas, 10 ans

Pour toutes les durées supérieures à 25 ans
et toutes les plages possibles,
régression de $N - F$ par T

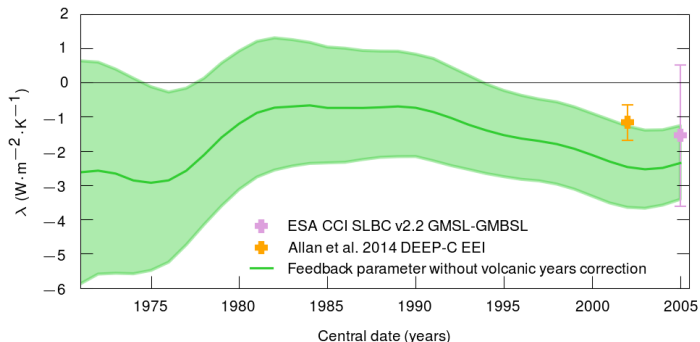
[MEYSSIGNAC *et al.*, *subm.*]



Section à $D = 25$ ans (médiane, 17%-83%) [MEYSSIGNAC *et al.*, *subm.*]

Variables non corrigées de l'effet des éruptions majeures

+ deux régression de séries courtes



- variations visibles du paramètre λ à partir de la série longue (1957-2017) pour $D \leq 35$ ans
- λ récent observable par régression à partir d'autres systèmes d'observation avec séries courtes dont géodésie spatiale

Résultats (3) : projections climatiques du GIEC avec borne basse de l'ECS à 2,4 K

Modèle de climat de l'émulateur :

$$\begin{array}{ll} \text{surface} & C \frac{dT}{dt} = F + \lambda T - \varepsilon \gamma (T - T_d) \\ \text{océan profond} & C_d \frac{dT_d}{dt} = \gamma (T - T_d) \end{array}$$

Principes :

- tout identique au 6^e rapport du GIEC (paramètres, échantillonnages, contraintes observationnelles)
- mais contrainte sur la distribution de λ du 6^e rapport du GIEC de façon que la borne basse de l'ECS vaille 2,4 K au lieu de 2,0 K, mais avec la même borne haute (5,0 K)
- intégrer le système d'équations différentielles pour en déduire T
- déduire T , puis GMTSL de N avec deux mises à jour de paramètres basées sur des observations :
 - ▶ $\beta = 0,93$ au lieu de 1,0
 - ▶ $EEH = 0,145 \pm 0,001 \text{ m}\cdot\text{YJ}^{-1}$ [MARTI *et al.*, 2022] au lieu de $0,113 \pm 0,013 \text{ m}\cdot\text{YJ}^{-1}$

Résultats (3) : projections climatiques du GIEC avec borne basse de l'ECS à 2,4 K

Modèle de climat de l'émulateur :

$$\begin{array}{ll} \text{surface} & C \frac{dT}{dt} = F + \lambda T - \varepsilon \gamma (T - T_d) \\ \text{océan profond} & C_d \frac{dT_d}{dt} = \gamma (T - T_d) \end{array}$$

Principes :

- tout identique au 6^e rapport du GIEC (paramètres, échantillonnages, contraintes observationnelles)
- mais contrainte sur la distribution de λ du 6^e rapport du GIEC de façon que la borne basse de l'ECS vaille 2,4 K au lieu de 2,0 K, mais avec la même borne haute (5,0 K)
- intégrer le système d'équations différentielles pour en déduire T
- déduire T , puis GMTSL de N avec deux mises à jour de paramètres basées sur des observations :
 - ▶ $\beta = 0,93$ au lieu de 1,0
 - ▶ $EEH = 0,145 \pm 0,001 \text{ m}\cdot\text{YJ}^{-1}$ [MARTI *et al.*, 2022] au lieu de $0,113 \pm 0,013 \text{ m}\cdot\text{YJ}^{-1}$

Résultats (3) : projections climatiques du GIEC avec borne basse de l'ECS à 2,4 K

Modèle de climat de l'émulateur :

$$\begin{array}{ll} \text{surface} & C \frac{dT}{dt} = F + \lambda T - \varepsilon \gamma (T - T_d) \\ \text{océan profond} & C_d \frac{dT_d}{dt} = \gamma (T - T_d) \end{array}$$

Principes :

- tout identique au 6^e rapport du GIEC (paramètres, échantillonnages, contraintes observationnelles)
- mais contrainte sur la distribution de λ du 6^e rapport du GIEC de façon que la borne basse de l'ECS vaille 2,4 K au lieu de 2,0 K, mais avec la même borne haute (5,0 K)
- intégrer le système d'équations différentielles pour en déduire T
- déduire T , puis GMTSL de N avec deux mises à jour de paramètres basées sur des observations :
 - ▶ $\beta = 0,93$ au lieu de 1,0
 - ▶ $EEH = 0,145 \pm 0,001 \text{ m}\cdot\text{YJ}^{-1}$ [MARTI *et al.*, 2022] au lieu de $0,113 \pm 0,013 \text{ m}\cdot\text{YJ}^{-1}$

Résultats (3) : projections climatiques du GIEC avec borne basse de l'ECS à 2,4 K

Modèle de climat de l'émulateur :

$$\begin{array}{ll} \text{surface} & C \frac{dT}{dt} = F + \lambda T - \varepsilon \gamma (T - T_d) \\ \text{océan profond} & C_d \frac{dT_d}{dt} = \gamma (T - T_d) \end{array}$$

Principes :

- tout identique au 6^e rapport du GIEC (paramètres, échantillonnages, contraintes observationnelles)
- mais contrainte sur la distribution de λ du 6^e rapport du GIEC de façon que la borne basse de l'ECS vaille 2,4 K au lieu de 2,0 K, mais avec la même borne haute (5,0 K)
- intégrer le système d'équations différentielles pour en déduire T
- déduire T , puis GMTSL de N avec deux mises à jour de paramètres basées sur des observations :
 - ▶ $\beta = 0,93$ au lieu de 1,0
 - ▶ $EEH = 0,145 \pm 0,001 \text{ m}\cdot\text{YJ}^{-1}$ [MARTI *et al.*, 2022] au lieu de $0,113 \pm 0,013 \text{ m}\cdot\text{YJ}^{-1}$

Résultats (3) : projections climatiques du GIEC avec borne basse de l'ECS à 2,4 K

Modèle de climat de l'émulateur :

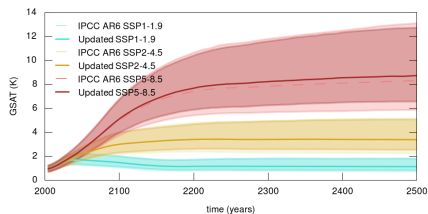
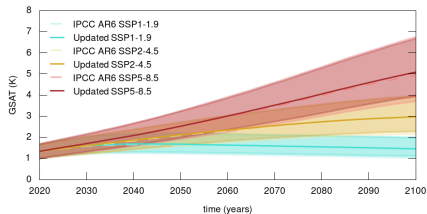
$$\begin{array}{ll} \text{surface} & C \frac{dT}{dt} = F + \lambda T - \varepsilon \gamma (T - T_d) \\ \text{océan profond} & C_d \frac{dT_d}{dt} = \gamma (T - T_d) \end{array}$$

Principes :

- tout identique au 6^e rapport du GIEC (paramètres, échantillonnages, contraintes observationnelles)
- mais contrainte sur la distribution de λ du 6^e rapport du GIEC de façon que la borne basse de l'ECS vaille 2,4 K au lieu de 2,0 K, mais avec la même borne haute (5,0 K)
- intégrer le système d'équations différentielles pour en déduire T
- déduire T , puis GMTSL de N avec deux mises à jour de paramètres basées sur des observations :
 - ▶ $\beta = 0,93$ au lieu de 1,0
 - ▶ $EEH = 0,145 \pm 0,001 \text{ m}\cdot\text{YJ}^{-1}$ [MARTI *et al.*, 2022] au lieu de $0,113 \pm 0,013 \text{ m}\cdot\text{YJ}^{-1}$

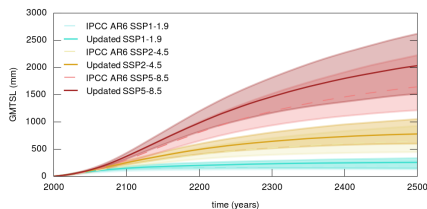
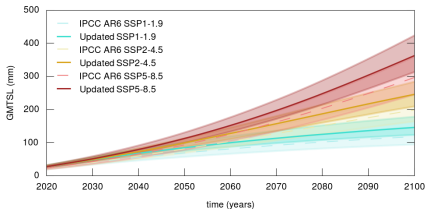
Température

Résultats : température de surface



Scenario	Température (2081-2100) (K)		Température (2481-2500) (K)	
	IPCC AR6	Contr. ECS	IPCC AR6	Contr. ECS
SSP1-1.9	1.4 [1.0 ; 1.8]	1.5 [1.1 ; 2.0] (+7.1%)	1.0 [0.7 ; 1.8]	1.1 [0.8 ; 1.8] (+10.0%)
SSP2-4.5	2.7 [2.1 ; 3.5]	2.9 [2.2 ; 3.8] (+7.4%)	3.2 [2.2 ; 5.1]	3.4 [2.5 ; 5.0] (+6.2%)
SSP5-8.5	4.4 [3.3 ; 5.7]	4.6 [3.5 ; 6.2] (+4.5%)	8.4 [5.8 ; 13.0]	8.8 [6.5 ; 12.6] (+4.8%)

Résultats : contribution thermostérique de l'élévation du niveau global moyen de la mer



Scenario	GMTSL (2100) (mm)			GMTSL (2500) (mm)		
	IPCC AR6	λ seul	(λ, β, EEH)	IPCC AR6	λ seul	(λ, β, EEH)
SSP1-1.9	120 [90;150]	120 [98;149]	144 [122;176]	184 [122;276]	198 [120;288]	251 [143;325]
SSP2-4.5	200 [160;240]	+0% [+9%;-0%]	+20% [+36%;+17%]	631 [433;918]	+8% [-2%;+4%]	+36% [+17%;+18%]
		+2% [+4%;+0%]	+22% [+4;+17%]		-0% [+8%;-6%]	+26% [+37%;+13%]
SSP5-8.5	300 [240;360]	304 [253;366]	363 [312;422]	1656 [1221;2202]	1694 [1242;2265]	2038 [1520;2606]
		+1% [+5%;+2%]	+21% [+30%;+17%]		+2% [+2%;+3%]	+23% [+24%;+18%]

Faible rôle de λ seul (sauf borne basse)

Importantes conséquences de la mise à jour de β et EEH !

Glaciers et calotte du Groenland : quasi-indépendantes de l'ECS (trop d'incertitudes persistantes)

Conclusions

- sur la base d'une régression de données récentes et validées, avec quantification rigoureuse des incertitudes :
 - ▶ **une faible ECS ($\leq 2,4$ K) est très improbable** (vs 2,0 K dans le 6^e rapport du GIEC : +20%)
 - ▶ Réconciliation d'estimations issues d'observations et de modèles
- **Première série temporelle observationnelle historique de $\lambda(t)$** : contrainte pour les simulations des modèles de climat
- Sur le rôle de la géodésie dans les sciences du climat :
 - ▶ **Première estimation de la sensibilité climatique avec données de géodésie**
 - ▶ Perspectives d'un système d'observation géodésique de suivi de $\lambda(t)$
i.e. la réponse de la Terre aux émissions de gaz à effet de serre (politiques d'atténuation du changement climatique)
 - ▶ besoins d'améliorations conséquentes sur la fermeture du bilan du niveau de la mer :
actuellement $\pm 0,3$ mm/an sur 20 ans soit $\pm 0,14$ W·m⁻² sur EEI sur 20 ans
besoin de $\pm 0,10$ W·m⁻² sur EEI sur 10 ans soit $\pm 0,2$ mm/an sur 10 ans
⇒ stabilité du repère de référence (ITRF) avec amélioration du géocentre
⇒ meilleure cohérence du degré 1 du géoïde (géocentre) avec l'origine de l'ITRF
- besoin de modéliser l'évolution future de λ dans les projections climatique (si λ est moins négatif, T augmente plus fort)

Conclusions

- sur la base d'une régression de données récentes et validées, avec quantification rigoureuse des incertitudes :
 - ▶ **une faible ECS ($\leq 2,4$ K) est très improbable** (vs 2,0 K dans le 6^e rapport du GIEC : +20%)
 - ▶ Réconciliation d'estimations issues d'observations et de modèles
- **Première série temporelle observationnelle historique de $\lambda(t)$: contrainte pour les simulations des modèles de climat**
- Sur le rôle de la géodésie dans les sciences du climat :
 - ▶ Première estimation de la sensibilité climatique avec données de géodésie
 - ▶ Perspectives d'un système d'observation géodésique de suivi de $\lambda(t)$
i.e. la réponse de la Terre aux émissions de gaz à effet de serre (politiques d'atténuation du changement climatique)
 - ▶ besoins d'améliorations conséquentes sur la fermeture du bilan du niveau de la mer :
actuellement $\pm 0,3$ mm/an sur 20 ans soit $\pm 0,14$ W·m⁻² sur EEI sur 20 ans
besoin de $\pm 0,10$ W·m⁻² sur EEI sur 10 ans soit $\pm 0,2$ mm/an sur 10 ans
⇒ stabilité du repère de référence (ITRF) avec amélioration du géocentre
⇒ meilleure cohérence du degré 1 du géoïde (géocentre) avec l'origine de l'ITRF
- besoin de modéliser l'évolution future de λ dans les projections climatique (si λ est moins négatif, T augmente plus fort)

Conclusions

- sur la base d'une régression de données récentes et validées, avec quantification rigoureuse des incertitudes :
 - ▶ **une faible ECS ($\leq 2,4$ K) est très improbable** (vs 2,0 K dans le 6^e rapport du GIEC : +20%)
 - ▶ Réconciliation d'estimations issues d'observations et de modèles
- **Première série temporelle observationnelle historique de $\lambda(t)$** : contrainte pour les simulations des modèles de climat
- **Sur le rôle de la géodésie dans les sciences du climat** :
 - ▶ **Première estimation de la sensibilité climatique avec données de géodésie**
 - ▶ Perspectives d'un système d'observation géodésique de suivi de $\lambda(t)$
i.e. la réponse de la Terre aux émissions de gaz à effet de serre (politiques d'atténuation du changement climatique)
 - ▶ besoins d'améliorations conséquentes sur la fermeture du bilan du niveau de la mer :
actuellement $\pm 0,3$ mm/an sur 20 ans soit $\pm 0,14$ W·m⁻² sur EEI sur 20 ans
besoin de $\pm 0,10$ W·m⁻² sur EEI sur 10 ans soit $\pm 0,2$ mm/an sur 10 ans
⇒ stabilité du repère de référence (ITRF) avec amélioration du géocentre
⇒ meilleure cohérence du degré 1 du géoïde (géocentre) avec l'origine de l'ITRF
- besoin de modéliser l'évolution future de λ dans les projections climatique (si λ est moins négatif, T augmente plus fort)

Conclusions

- sur la base d'une régression de données récentes et validées, avec quantification rigoureuse des incertitudes :
 - ▶ **une faible ECS ($\leq 2,4$ K) est très improbable** (vs 2,0 K dans le 6^e rapport du GIEC : +20%)
 - ▶ Réconciliation d'estimations issues d'observations et de modèles
- **Première série temporelle observationnelle historique de $\lambda(t)$** : contrainte pour les simulations des modèles de climat
- Sur le rôle de la géodésie dans les sciences du climat :
 - ▶ **Première estimation de la sensibilité climatique avec données de géodésie**
 - ▶ Perspectives d'un système d'observation géodésique de suivi de $\lambda(t)$
i.e. la réponse de la Terre aux émissions de gaz à effet de serre (politiques d'atténuation du changement climatique)
 - ▶ besoins d'améliorations conséquentes sur la fermeture du bilan du niveau de la mer :
actuellement $\pm 0,3$ mm/an sur 20 ans soit $\pm 0,14$ W·m⁻² sur EEI sur 20 ans
besoin de $\pm 0,10$ W·m⁻² sur EEI sur 10 ans soit $\pm 0,2$ mm/an sur 10 ans
⇒ stabilité du repère de référence (ITRF) avec amélioration du géocentre
⇒ meilleure cohérence du degré 1 du géoïde (géocentre) avec l'origine de l'ITRF
- **besoin de modéliser l'évolution future de λ dans les projections climatique (si λ est moins négatif, T augmente plus fort)**

Conclusions

- sur la base d'une régression de données récentes et validées, avec quantification rigoureuse des incertitudes :
 - ▶ **une faible ECS ($\leq 2,4$ K) est très improbable** (vs 2,0 K dans le 6^e rapport du GIEC : +20%)
 - ▶ Réconciliation d'estimations issues d'observations et de modèles
- **Première série temporelle observationnelle historique de $\lambda(t)$** : contrainte pour les simulations des modèles de climat
- Sur le rôle de la géodésie dans les sciences du climat :
 - ▶ **Première estimation de la sensibilité climatique avec données de géodésie**
 - ▶ Perspectives d'un système d'observation géodésique de suivi de $\lambda(t)$
i.e. la réponse de la Terre aux émissions de gaz à effet de serre (politiques d'atténuation du changement climatique)
 - ▶ besoins d'améliorations conséquentes sur la fermeture du bilan du niveau de la mer :
actuellement $\pm 0,3$ mm/an sur 20 ans soit $\pm 0,14$ W·m⁻² sur EEI sur 20 ans
besoin de $\pm 0,10$ W·m⁻² sur EEI sur 10 ans soit $\pm 0,2$ mm/an sur 10 ans
⇒ stabilité du repère de référence (ITRF) avec amélioration du géocentre
⇒ meilleure cohérence du degré 1 du géoïde (géocentre) avec l'origine de l'ITRF
- besoin de modéliser l'évolution future de λ dans les projections climatique (si λ est moins négatif, T augmente plus fort)

Merci de votre attention

Some references

- ANDREWS, Timothy, Jonathan GREGORY, David PAYNTER, Levi G. SILVERS, Chen ZHOU & Thorsten MAURITSEN (2018). « *Accounting for changing temperature patterns increases historical estimates of climate sensitivity* ». *Geophys. Res. Lett.* 45, p. 8490-8499.
- ARIAS, P. A., N. BELLOUIN, E. COPPOLA, R. G. JONES, G. KRINNER, J. MAROTZKE, V. NAIK, M. D. PALMER, G-K. PLATTNER, J. ROGELJ, M. ROJAS, J. SILLMANN, T. STORELMO, P. W. THORNE, B. TREWIN, K. Achuta RAO, B. ADHIKARY, R. P. ALLAN, K. ARMOUR, G. BALA, R. BARIMALALA, S. BERGER, J. G. CANADELL, C. CASSOU, A. CHERCHI, W. COLLINS, W. D. COLLINS, S. L. CONNORS, S. CORTI, F. CRUZ, F. J. DENTENER, C. DERECZYNSKI, A. Di LUCA, A. Diongue NIANG, F. J. DOBLAS-REYES, A. DOSIO, H. DOUVILLE, F. ENGELBRECHT, V. EYRING, E. FISCHER, P. FORSTER, B. FOX-KEMPER, J. S. FUGLESTVEDT, J. C. FYFE, N. P. GILLETT, L. GOLDFARB, I. GORODETSKAYA, J. M. GUTIERREZ, R. HAMD, E. HAWKINS, H. T. HEWITT, P. HOPE, A. S. ISLAM, C. JONES, D. S. KAUFMAN, R. E. KOPP, Y. KOSAKA, J. KOSSIN, S. KRAKOVSKA, J.-Y. LEE, J. LI, T. MAURITSEN, T. K. MAYCOCK, M. MEINSHAUSEN, S-K. MIN, P. M. S. MONTEIRO, T. NGO-DUC, F. OTTO, I. PINTO, A. PIRANI, K. RAGHAVAN, R. RANASINGHE, A. C. RUANE, L. RUIZ, J-B. SALLÉE, B. H. SAMSET, S. SATHYENDRANATH, S. I. SENEVIRATNE, A. A. SÖRENNSSON, S. SZOPA, I. TAKAYABU, A-M. TREGUIER, B. van den HURK, R. VAUTARD, K. von SCHUCKMANN, S. ZAEHLE, X. ZHANG & K. ZICKFELD (2021). « *Technical Summary* ». *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Sous la dir. de MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, A. PIRANI, S. L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M. I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZELL, E. LONNOY, J. B. R. MATTHEWS, T. K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU & B. ZHOU. Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- ARMOUR, Kyle C., Cecilia M. BITZ & Gerard H. ROE (2013). « *Time-Varying Climate Sensitivity from Regional Feedbacks* ». *Journal of Climate* 26.13, p. 4518-4534. DOI : 10.1175/JCLI-D-12-00544.1.
- ARRHENIUS, Svante (1896). « *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground* ». *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 41.251, p. 237-276.
- BAGNELL, A. & T. DE VRIES (2021). « *20th century cooling of the deep ocean contributed to delayed acceleration of Earth's energy imbalance* ». *Nature Communications* 12.1, p. 1-10.
- BELLOUIN, N., J. QUAAS, E. GRYSPEERDT, S. KINNE, P. STIER, D. WATSON-PARRIS, Olivier BOUCHER, K. S. CARSLAW, M. CHRISTENSEN, A.-L. DANIAU, Jean-Louis DUFRESNE, G. FEINGOLD, Stephanie FIEDLER, Piers M. FORSTER, Andrew GETTELMAN, J. M. HAYWOOD, U. LOHMANN, F. MALAVELLE, Thorsten MAURITSEN, Daniel T. MCCOY, G. MYHRE, J. MÜLMENSTÄDT, D. NEUBAUER, A. POSSNER, Maria A. A. RUGENSTEIN, Y. SATO, Michael SCHULZ, S. E. SCHWARTZ, O. SOURDEVAL, Trude STORELMO, V. TOLL, D. WINKER & Bjorn STEVENS (2020). « *Bounding global aerosol radiative forcing of climate change* ». *Reviews of Geophysics* 58.1, e2019RG000660.
- BUDYKO, Mikhaïl (1968). « *On the origin of ice ages* ». *Meteorol. Gidrol* 11, p. 3-12.
- CHARNEY, Jule G., Akio ARAKAWA, D. James BAKER, Bert BOLIN, Robert Earl DICKINSON, M. GOODY Richard, Cecil E. LEITH, Henry M. STOMMEL & Carl I. WUNSCH (1979). *Carbon Dioxide and Climate : A Scientific Assessment*. The national Academies press. Washington D.C. : National research council.
- CHENAL, Jonathan, Benoît MEYSSIGNAC, Aurélien RIBES & Robin GUILLAUME-CASTEL (2022). « *Observational constraint on the climate sensitivity to atmospheric CO₂ concentrations derived from the 1971-2017 global energy budget* ». *Journal of climate* 35.14, p. 4469-4483. DOI : 10.1175/JCLI-D-21-0565.1.
- CHENG, Lijing, Kevin E TRENBERTH, John FASULLO, Tim BOYER, John ABRAHAM & Jiang ZHU (2017). « *Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015* ». *Sc. Adv.* 3.3, e1601545.

- CHURCH, John A., J. N. WHITE, L. F. KONIKOW, Catia M. DOMINGUES, J. G. COGLEY, Éric RIGNOT, Jonathan GREGORY, Michiel R. van den BROEKE, A. J. MONAGHAN & I. VELICOGNA (2011). « *Revisiting the Earth's sea-level and energy budgets from 1961 to 2008* ». *Geophys. Res. Lett.* 38.L18601. doi : doi:10.1029/2011GL048794.
- COWTAN, Kevin & Robert G. WAY (2014). « *Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends* ». *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 140.683, p. 1935-1944.
- DICKINSON, Robert Earl, Robert D. CESS & R. T. WETHERALD (1982). « *Modeling climate changes due to carbon dioxide increases.* » *Unknown Journal*, p. 101-142.
- FORSTER, Piers M., Trude STORELVMO, Kyle C. ARMOUR, M. COLLINS, Jean-Louis DUFRESNE, D. J. FRAME, D. J. LUNT, Thorsten MAURITSEN, Matthew D. PALMER, Masahiro WATANABE, M. WILD & H. ZHANG (2021). « *The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity* ». *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Sous la dir. de MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, A. PIRANI, S. L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M. I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZEL, E. LONNOY, J. B. R. MATTHEWS, T. K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU & B. ZHOU. Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- FREDERIKSE, Thomas, Felix W. LANDERER, Lambert CARON, Surendra ADHIKARI, David PARKES, Vincent W. HUMPHREY, Sönke DANGENDORF, Peter HOGARTH, Laure ZANNA, Lijing CHENG & Yun-Hao WU (2020). « *The causes of sea-level rise since 1900* ». *Nature* 584.7821, p. 393-397.
- GOOD, Simon A, Matthew J MARTIN & Nick A RAYNER (2013). « *EN4 : Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates* ». *J. Geophys. Res. : Oc.* 118.12, p. 6704-6716.
- GOURETSKI, Viktor & Klaus Peter KOLTERMANN (2007). « *How much is the ocean really warming ?* » *Geophys. Res. Lett.* 34.1. doi : <https://doi.org/10.1029/2006GL027834>.
- GREGORY, Jonathan & Timothy ANDREWS (2016). « *Variation in climate sensitivity and feedback parameters during the historical period* ». *Geophys. Res. Lett.* 43.8, p. 3911-3920. doi : <https://doi.org/10.1002/2016GL068406>.
- HAKUBA, Maria Z., Thomas FREDERIKSE & Felix W. LANDERER (2021). « *Earth's Energy Imbalance from the ocean perspective (2005-2019)* ». *Geophys. Res. Lett.* e2021GL093624.
- HANSEN, James, M. SATO, Reto RUEDY, Larissa NAZARENKO, Andrew A. LACIS, Gavin A. SCHMIDT, Gary L. RUSSELL, Igor ALEINOV, Mike BAUER, Susanne E. BAUER, N. BELL, B. CAIRNS, Vittorio CANUTO, M. CHANDLER, Lijing CHENG, Anthony D. DEL GENIO, Greg FALUVEGI, E. FLEMING, A. FRIEND, Alex HALL, C. JACKMAN, Maxwell KELLEY, Nancy Y. KIANG, D. KOCH, J. LEAN, J. LERNER, Ken K. LO, S. MENON, Sonya K. MILLER, Patrick MINNIS, T. NOVAKOV, Valdar OINAS, Jan P. PERLWITZ, Ju. PERLWITZ, David RIND, Anastasia ROMANOU, Drew T. SHINDELL, D. A. STONE, Shan SUN, Nick TAUSNEV, D. THRESHER, Bruce A. WIELICKI, M. YAO & S. ZHANG (2005). « *Efficacy of climate forcings* ». *J. Geophys. Res. : Atmos.* 110.D18. doi : 10.1029/2005JD005776.
- IPCC (2013). « *Summary for policy makers* ». *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Sous la dir. de T. F. STOCKER, D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, Myles R. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX & P. M. MIDGLEY. Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- ISHII, Masayoshi, Yoshikazu FUKUDA, Shoji HIRAHARA, Soichiro YASUI, Toru SUZUKI & Kanako SATO (2017). « *Accuracy of global upper ocean heat content estimation expected from present observational data sets* ». *Sola* 13, p. 163-167.
- LEVITUS, Sydney, J. I. ANTONOV, Tim BOYER, Olga K. BARANOVA, Hernan Eduardo GARCIA, R. A. LOCARNINI, Alejandro RICARDO, A. V. MISHONOV, J. R. REAGAN, Dan SEIDOV, Evgeney YAROSH & M. M. ZHENG (2012). « *World ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010* ». *Geophysical Research Letters* 39.10.

- LEVITUS, Sydney, J. I. ANTONOV, Tim BOYER, R. A. LOCARNINI, Hernan Eduardo GARCIA & A. V. MISHONOV (2009). « *Global ocean heat content 1955-2008 in light of recently revealed instrumentation problems* ». *Geophys. Res. Lett.* 36.7. DOI : <https://doi.org/10.1029/2008GL037155>.
- LOEB, Norman G., David R. DOELLING, Hailan WANG, Wenyng SU, Cathy NGUYEN, Joseph G. CORBETT, Lusheng LIANG, Cristian MITRESCU, Fred G. ROSE & Seiji KATO (2018). « *Clouds and the earths radiant energy system (CERES) energy balanced and filled (EBAF) top-of-atmosphere (TOA) edition-4.0 data product* ». *Journal of climate* 31.2, p. 895-918.
- LOEB, Norman G., Gregory C. JOHNSON, Tyler J THORSEN, John M. LYMAN, Fred G. ROSE & Seiji KATO (2021). « *Satellite and ocean data reveal marked increase in Earths heating rate* ». *Geophys. Res. Lett.* 48.13, e2021GL093047.
- MANABE, Syukuro & R. T. WETHERALD (1967). « *Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity* ». *J. Atmos. Sci.* 24.3, p. 241-259.
- MARTI, Florence, Alejandro BLAZQUEZ, Benoît MEYSSIGNAC, Michaël ABLAIN, Anne BARNOUD, Robin FRAUDEAU, Rémi JUGIER, Jonathan CHENAL, Gilles LARNICOL, Julia PFEFFER, Jérôme BENVENISTE & Marco RESTANO (2022). « *Monitoring the ocean heat content and the earth energy imbalance from space altimetry and space gravimetry* ». *Earth Syst. Sc. Dat.* 14.1, p. 229-249.
- MARVEL, Kate, Gavin A. SCHMIDT, Sonya K. MILLER & Larissa NAZARENKO (2016). « *Implications for climate sensitivity from the response to individual forcings* ». *Nature Climate Change* 6.4, p. 386.
- MAURITSEN, Thorsten (2016). « *Clouds cooled the Earth* ». *Nature Geoscience* 9.12, p. 865-867.
- MEYSSIGNAC, Benoît, Tim BOYER, Zhongxiang ZHAO, Maria Z. HAKUBA, Felix W. LANDERER, Detlef STAMMER, Armin KÖHL, Seiji KATO, Tristan LÉCUYER, Michaël ABLAIN, John Patrick ABRAHAM, Alejandro BLAZQUEZ, Anny CAZENAVE, John A. CHURCH, Rebecca COWLEY, Lijing CHENG, Catia M. DOMINGUES, Donata GIGLIO, Viktor GOURETSKI, Masayoshi ISHII, Gregory C. JOHNSON, Rachel E. KILLICK, David LEGLER, William LLOVEL, John M. LYMAN, Matthew D. PALMER, Steve PIOTROWICZ, Sarah G. PURKEY, Dean ROEMMICH, Rémy ROCA, Abhishek SAVITA, Karina von SCHUCKMANN, Sabrina SPEICH, Graeme STEPHENS, Gongjie WANG, Susan Elisabeth WIFFELS & Nathalie ZILBERMAN (2019). « *Measuring Global Ocean Heat Content to Estimate the Earth Energy Imbalance* ». *Frontiers in Marine Science* 6, p. 432. ISSN : 2296-7745. DOI : 10.3389/fmars.2019.00432.
- MEYSSIGNAC, Benoît, Jonathan CHENAL, Norman G. LOEB & Robin GUILLAUME-CASTEL (subm.). « *Historical observations of the Earth energy budget show the climate feedback parameter varies with time in response to the Pacific Decadal Oscillation* ». *Nature Communications Earth & Environment* tbd, tbd.
- RAMANATHAN, V. (1987). « *The role of earth radiation budget studies in climate and general circulation research* ». *J. Geophys. Res. : Atmos.* 92.D4, p. 4075-4095. DOI : 10.1029/JD092iD04p04075.
- (1988). « *The Greenhouse Theory of Climate Change : A Test by an Inadvertent Global Experiment* ». *Science* 240.4850, p. 293-299. ISSN : 0036-8075. DOI : 10.1126/science.240.4850.293.
- RICHARDSON, Mark, Kevin COWTAN, Ed HAWKINS & Martin B. STOLPE (2016). « *Reconciled climate response estimates from climate models and the energy budget of Earth* ». *Nature Climate Change* 6.10, p. 931-935.
- SENIOR, Catherine A. & John F. B MITCHELL (2000). « *The time-dependence of climate sensitivity* ». *Geophysical Research Letters* 27.17, p. 2685-2688.
- SHERWOOD, S., Mark J. WEBB, J. D. ANNA, Kyle C. ARMOUR, Piers M. FORSTER, J. C. HARGREAVES, Gabriele C. HEGERL, Stephen A. KLEIN, Kate MARVEL, Eelco J. ROHLING, Masahiro WATANABE, Timothy ANDREWS, Pascale BRACONNOT, Christopher S. BRETHERTON, G. L. FOSTER, Zeke HAUSFATHER, A. S. VON DER HEYDT, Reto KNUTTI, Thorsten MAURITSEN, Joel R. NORRIS, Cristian PROILOSESCU, Maria A. A. RUGENSTEIN, Gavin A. SCHMIDT, Katarzyna B. TOKARSKA & Mark D. ZELINKA (2020). « *An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence* ». *Reviews of Geophysics* 58, e2019RG000678. DOI : 10.1029/2019RG000678.

- SMITH, C., Ryan J. KRAMER, Ryan J. KRAMER, G. MYHRE, Kari ALTERSJØLØ, M. COLLINS, Adriana SIMA, Claude BOUCHER, Jean-Louis DUFRESNE, Pierre NABAT, Martine MICHOU, Seiji YUKIMOTO, Jason N. S. COLE, David PAYNTER, Hideo SHIOGAMA, Fiona M. O'CONNOR, Eddy ROBERTSON, Andy WILTSHIRE, Timothy ANDREWS, Cécile HANNAY, Ron L. MILLER, Larissa NAZARENKO, Alf KIRKEVÅG, Dirk OLIVIÉ, Stephanie FIEDLER, Anna LEWISCHAL, Chloe MACKALLAH, Martin DIX, Robert PINCUS & Piers M. FORSTER (2020). « *Effective radiative forcing and adjustments in CMIP6 models* ». *Atmos. Chem. Phys.* 20.16, p. 9591-9618.
- VON SCHUCKMANN, Karina, Lijing CHENG, Matthew D. PALMER, James HANSEN, Caterina TASSONE, Valentin AICH, Susheel ADUSUMILLI, Hugo BELTRAMI, Tim BOYER, Francisco-José CUEST-VALERO, Damien DESBRUYÈRES, Catia M. DOMINGUES, Almudena GARCÍA-GARCÍA, Pierre GENTINE, John GILSON, Maximilian GORFER, Leopold HAIMBERGER, Masayoshi ISHII, Gregory C. JOHNSON, Rachel E. KILLICK, Brian A. KING, Gottfried KIRCHENGAST, Nicolas KOŁODZIEJCZYK, John M. LYMAN, Ben MARZEION, Michael MAYER, Maeva MONIER, Didier Paolo MONSELESAN, Sarah G. PURKEY, Dean ROEMMICH, Axel SCHWEIGER, Sonia I. SENEVIRATNE, Andrew SHEPERD, Donald A. SLATER, Andrea K. STEINER, Fiammetta STRANEO, Mary-Louise TIMMERMANS & Susan Elisabeth WIJFFELS (2020). « *Heat stored in the Earth system : where does the energy go ?* » *Earth Syst. Sc. Dat.* 12, p. 2013-2041.
- VON SCHUCKMANN, Karina, Matthew D. PALMER, Kevin E. TRENBERTH, Anny CAZENAVE, D CHAMBERS, N. CHAMPOLLION, James HANSEN, S. A. JOSEY, Norman G. LOEB & P.-P. MATHIEU (2016). « *An imperative to monitor Earth's energy imbalance* ». *Nature Climate Change* 6.2, p. 138-144.
- ZHOU, Chen, Mark D. ZELINKA, A. E. DESSLER & M. WANG (2021). « *Greater committed warming after accounting for the pattern effect* ». *Nature Climate Change* 11.2, p. 132-136.
- ZHOU, Chen, Mark D. ZELINKA & Stephen A. KLEIN (2016). « *Impact of decadal cloud variations on the Earth's energy budget* ». *Nature Geoscience* 9.12, p. 871-874.