

# Des émissions de gaz à effet de serre à l'élévation du niveau de la mer : contraindre la dynamique du bilan d'énergie planétaire par la géodésie spatiale

■ Jonathan CHENAL - Benoît MEYSSIGNAC

## MOTS-CLÉS

Changement climatique, déséquilibre énergétique planétaire, niveau de la mer

*Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre conduisent à l'apparition d'une différence en haut de l'atmosphère entre le flux radiatif solaire reçu par la Terre et le flux radiatif infrarouge émis par la Terre. On appelle cette différence le déséquilibre énergétique planétaire, qui correspond à l'énergie additionnelle stockée par le système climatique. Le déséquilibre énergétique planétaire est donc la cause du réchauffement global. De plus, comme 90 % du réchauffement global est absorbé par l'océan, le déséquilibre énergétique planétaire est la cause d'une contribution importante à l'élévation du niveau de la mer. Difficile à mesurer directement par méthode radiative, le déséquilibre énergétique planétaire peut être déduit par la mesure géodésique de sa contribution à l'élévation du niveau de la mer. Cette méthode géodésique permet de contraindre la dynamique du bilan d'énergie planétaire pour mieux anticiper les conséquences du changement climatique.*

## Introduction

Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont sans équivoque la cause du changement climatique actuel. Parmi les conséquences de celui-ci, l'élévation du niveau de la mer est une source importante de préoccupation pour les zones littorales, qui sont les plus densément peuplées dans le monde. Or les projections climatiques actuelles d'élévation du niveau de la mer, comme des autres variables climatiques, souffrent d'incertitudes encore importantes qui sont symptomatiques d'incompréhensions encore majeures de la réponse de la Terre aux émissions de gaz à effet de serre. Le rôle clé joué par l'océan dans la dynamique du bilan d'énergie du système climatique permet d'envisager l'élévation du niveau de la mer non seulement pour les conséquences qu'elle aura pour les littoraux, mais aussi pour en tirer des informations sur le système climatique lui-même. En effet, l'observation du niveau de la mer et la fermeture du bilan de ses contributions permet d'estimer les variations des principaux réservoirs d'énergie du système climatique et ouvrent de nouvelles perspectives pour améliorer la compréhension du système climatique et suivre son évolution en

réponse aux émissions de gaz à effet de serre.

Cet article présente d'abord la physique de la réponse radiative de la Terre aux émissions de gaz à effet de serre et l'apparition du déséquilibre énergétique planétaire (I), puis l'élévation du niveau de la mer en tant que manifestation majeure du changement climatique et la méthode géodésique pour évaluer le déséquilibre énergétique planétaire à partir de la mesure du niveau de la mer (II).

## Émissions de gaz à effet de serre et anomalie dans la réponse radiative de la Terre

### ■ Rayonnement solaire, température de surface, rayonnement infrarouge terrestre

Le Soleil est la principale source d'énergie du système climatique. Son rayonnement est maximal dans la partie visible du spectre électromagnétique. Une petite fraction de ce flux est captée par la Terre. Cela représente  $340 \text{ W/m}^2$  en moyenne à la surface de la Terre. L'albédo de la Terre, c'est-à-dire la capacité de celle-ci à réfléchir le rayonnement, est de l'ordre de 0,3,

si bien qu'environ  $240 \text{ W/m}^2$  pénètrent effectivement dans le système climatique et  $100 \text{ W/m}^2$  sont directement réfléchis vers l'espace. Le rayonnement capté traverse l'atmosphère jusqu'à la surface et y est absorbé. Ce flux est la principale source d'énergie du système climatique, qui permet la mise en mouvement de l'ensemble du système (figure 1).

En réponse à l'absorption du rayonnement solaire visible par la surface et l'atmosphère, ceux-ci émettent un rayonnement dans le domaine infrarouge. Or, l'atmosphère est majoritairement opaque dans ce domaine spectral, en raison de la présence de gaz à effet de serre (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, etc.). En absorbant le rayonnement infrarouge qu'émettent la surface et l'atmosphère, l'atmosphère se réchauffe elle-même et émet à son tour un rayonnement infrarouge isotrope : une moitié est émise vers le haut, jusqu'à ne plus être réabsorbée et se propager librement hors de l'atmosphère à une altitude appelée dernière altitude d'émission thermique, tandis qu'une autre moitié est émise vers la surface et contribue à la réchauffer. Sans atmosphère, la température de surface de la Terre serait de  $-18$  degrés

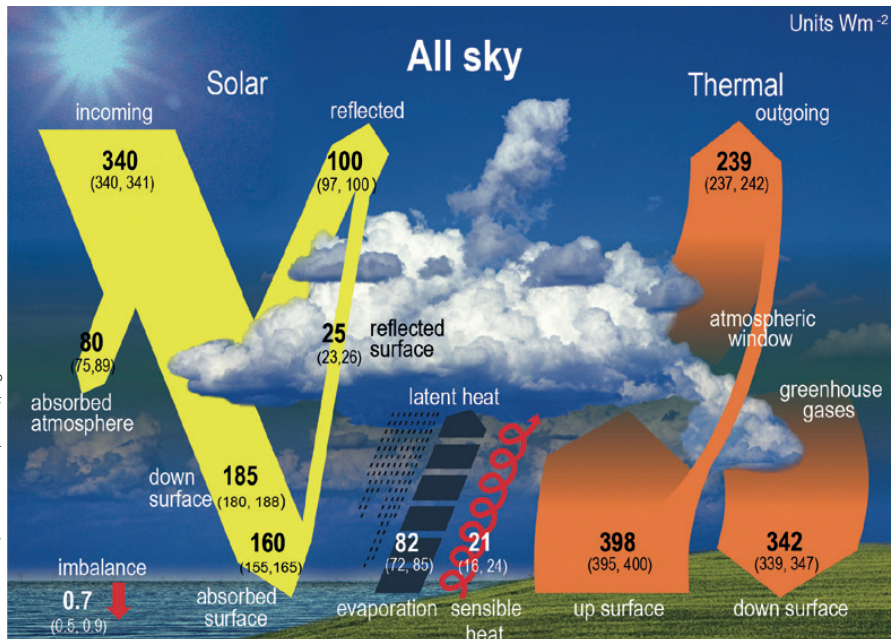


Figure 1. Flux entrant, sortant et internes au système climatique.

Celsius ; avec l'atmosphère, elle est de +13 degrés : c'est l'effet de serre. Au sommet de l'atmosphère, on parle d'équilibre radiatif lorsque le flux solaire visible net entrant dans le système climatique est égal au flux infrarouge sortant.

### ■ Émissions de gaz à effet de serre, déséquilibre énergétique planétaire

Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre font augmenter la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre en raison du long temps de résidence de ceux-ci (plus d'un siècle pour le dioxyde de carbone par exemple). Cette augmentation de leur concentration rend la Terre plus opaque au rayonnement infrarouge. Ainsi, l'altitude de dernière émission thermique s'élève et donc la température associée à cette émission diminue et le flux infrarouge net sortant émis par la Terre diminue (loi de Stefan-Boltzman). Comme la Terre reçoit toujours le même flux solaire incident et que le flux infrarouge sortant diminue, il apparaît une différence entre les deux flux. Cette différence est appelée forçage radiatif tant que le système climatique n'y a pas encore répondu. Le système climatique s'ajuste toutefois pour rétablir l'égalité des flux entrant et sortant en se réchauffant. Cet ajustement est appelé réponse radiative de la Terre et elle dépend de la température de surface. À mesure que la température de surface augmente, la différence entre le forçage radiatif et la

réponse radiative de la Terre est appelée déséquilibre énergétique planétaire ; celui-ci se réduit au fur et à mesure de l'augmentation de la température de surface, mais cela prend du temps du fait de l'inertie du système climatique (typiquement plusieurs décennies à plusieurs siècles). Le déséquilibre énergétique planétaire représente donc à la fois la différence entre les flux radiatifs entrant et sortant au sommet de l'atmosphère, mais aussi la différence entre le forçage radiatif dû aux gaz à effet de serre et la réponse radiative proportionnelle à la température de surface. Le déséquilibre énergétique planétaire, en tant que différence de flux radiatifs, représente la quantité d'énergie absorbée par le système climatique. Selon le ch. 7 du 6<sup>e</sup> rapport du groupe I du GIEC (Forster et al., 2021), 91 % de cette énergie est absorbée par l'océan sous forme de chaleur, 3 % par la cryosphère, 5 % par les surfaces continentales et 1 % par l'atmosphère (figure 2).

Le déséquilibre énergétique planétaire est petit par rapport aux flux d'énergie entrant et sortant du système climatique en haut de l'atmosphère, d'environ deux ordres de grandeur plus petit. Selon le ch. 7 du 6<sup>e</sup> rapport du groupe I du GIEC (Forster et al., 2021), sa valeur moyenne sur la période 2006-2018 vaut 0,79 [0,52;1,06] W/m<sup>2</sup> (médiane, 90 % intervalle de confiance). Cette petite valeur est difficile à mesurer par radiométrie en haut de l'atmosphère : la mission CERES de la NASA qui mesure le bilan radiatif en haut de l'atmos-

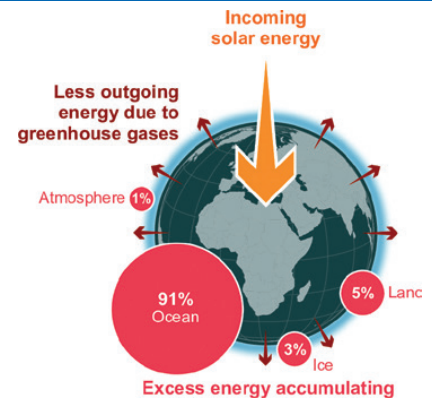


Figure 2. Répartition de la chaleur absorbée en raison du déséquilibre énergétique planétaire. Source : (Forster et al., 2021), FAQ 7.1.

phère a une précision de ~0.2 W/m<sup>2</sup> par décennie, mais une exactitude de seulement  $\pm 2.5$  W/m<sup>2</sup> en raison des difficultés de calibration absolue des radiomètres (Loeb et al., 2018). Elle ne permet donc pas de mesurer la valeur absolue du déséquilibre énergétique de la Terre. En revanche, il est possible de mesurer de manière absolue le stock d'énergie qui s'accumule dans l'océan et d'en déduire, par dérivation, le déséquilibre énergétique planétaire. Deux méthodes aujourd'hui permettent de faire cela précisément : 1) la mesure *in situ* quasi globale des températures de l'océan par la flotte de dériveurs autonomes Argo et 2) la mesure de l'expansion thermique de l'océan qui contribue à la hausse du niveau de la mer.

### L'élévation du niveau de la mer, manifestation de la réponse du système climatique aux émissions de gaz à effet de serre

#### ■ Mesures et causes de l'élévation du niveau de la mer

Les variations du niveau de la mer sont mesurées de longue date par les marégraphes et, depuis 1993 et le lancement de la mission Topex-Poséidon, par altimétrie spatiale (page 29, Prandi - Ablain). Le rythme d'élévation est mesuré entre 1971 et 2018 à environ 2,33 mm/an [1,55;3,12] (médiane, 90 % intervalle de confiance) (Fox-Kemper et al., 2021), et entre 1993 et 2021 à 3,3 mm/an  $\pm 0,3$  mm/an (Guérou et al., 2023), avec une accélération statistiquement significative de  $0,12 \pm 0,05$  mm/an<sup>2</sup>. Les contributions climatiques à cette élévation sont l'expansion thermique de l'eau de mer et le bilan de masse de l'océan.



Comme expliqué dans la première partie, l'océan absorbe une très large fraction du déséquilibre énergétique planétaire sous forme de chaleur. Cette absorption se traduit par la dilatation de l'eau de mer qui contribue à l'élévation du niveau de la mer. On peut calculer que  $0,1 \text{ W/m}^2$  de déséquilibre énergétique planétaire équivaut à  $0,24 \text{ mm/an}$  d'élévation du niveau de la mer (Meyssignac et al., 2023b) ; cette contribution à l'élévation du niveau de la mer est appelée la contribution thermostérique. La part de celle-ci est estimée par les mesures de température et salinité des campagnes hydrographiques et d'Argo (à partir de 1995) à environ 50,4 % entre 1971 et 2018, et à 38,6 % sur 2006-2018 (Fox-Kemper et al., 2021) (voir figure 3). Toutefois, cette contribution est loin d'être homogène à la surface de l'océan, et sa structure spatiale explique celle de l'élévation du niveau de mer. La mesure du contenu de chaleur de l'océan par les campagnes hydrographiques et par le réseau Argo se heurte à des difficultés de maîtrise instrumentale, de limite d'échantillonnage spatio-temporel (en particulier sur la verticale) et donc d'interpolation des mesures.

L'autre contribution à l'élévation du niveau de la mer est l'apport d'eau douce, qui augmente le bilan de masse de l'océan. Celui-ci se décompose en diverses contributions : la fonte des glaciers continentaux (22,2 % sur 1971-2018), de la calotte du Groenland (12,6 % également sur 1971-2018) et de la calotte de l'Antarctique (7,1 % sur 1971-2018), et les variations des stocks d'eau liquide

continentaux (7,7 % sur 1971-2018) (figure 3). Sur les figures 2 et 3, on peut noter que les quelques pourcents de déséquilibre énergétique planétaire absorbé par les glaces correspondent à une fraction importante (en l'occurrence 49,6 % sur 1971-2018) d'élévation du niveau de la mer. Cette contribution du bilan de masse de l'océan peut être mesurée par gravimétrie spatiale, avec les missions GRACE et GRACE-FO (Blazquez et al., 2018).

### ■ Contraindre le bilan d'énergie planétaire avec la géodésie spatiale

Si la mesure radiative directe du déséquilibre énergétique planétaire est difficile, sa mesure par l'intermédiaire du contenu de chaleur de l'océan offre une alternative qui donne accès à plus de 90 % du déséquilibre énergétique planétaire, mais l'accès au contenu de chaleur de l'océan par mesure de températures a des limites liées surtout à l'échantillonnage spatio-temporel. Pour y remédier, une méthode géodésique a été développée, consistant à calculer la contribution thermostérique par estimation de l'expansion thermique de l'océan à partir de la différence entre le niveau de la mer observé par altimétrie spatiale et la contribution à l'élévation du niveau de la mer due au bilan de masse de l'océan mesuré par gravimétrie spatiale (Marti et al., 2022). Cette méthode fournit une mesure sans limite de profondeur, avec une couverture globale homogène, et une bonne maîtrise des incertitudes du système d'observation, car elle utilise peu d'instruments (au total cinq alti-

mètres satellitaires à ce jour : Topex/Poséidon, Jason 1, 2, 3 et Sentinel-6 Michael Freilich). Elle permet un suivi du déséquilibre énergétique planétaire comparable à celui de CERES avec une résolution temporelle bisannuelle et une exactitude de  $\pm 0,2 \text{ W/m}^2$  (voir figure 4). Cette approche permet en outre de vérifier la fermeture du bilan du niveau de la mer (Barnoud et al., 2021, Meyssignac et al., 2023b).

Les leviers d'amélioration de la méthode géodésique sont identifiés et concernent d'abord l'altimétrie spatiale, avec l'objectif de réduire l'incertitude sur la tendance d'élévation du niveau de la mer de  $0,3 \text{ mm/an}$  sur 20 ans à  $0,1 \text{ mm/an}$  sur 10 ans (Meyssignac et al., 2023b), via l'amélioration des métadonnées de l'altimétrie, dont l'estimation de la correction de troposphère humide (en améliorant la stabilité des radiomètres embarqués ou en exploitant le potentiel du GNSS) et du repère international de référence terrestre (ITRF) (en densifiant le réseau de télémétrie laser sur satellites ou avec la future mission GENESIS). Ensuite, la continuation et l'amélioration de la gravimétrie spatiale sont envisagées avec les futures missions NGGM/MAGIC et CARIOQA. In fine, l'obtention de séries longues de déséquilibre énergétique planétaire permettra de contraindre la dynamique du bilan d'énergie planétaire et de caractériser la trajectoire climatique effectivement suivie par la planète en réponse aux émissions de gaz à effet de serre et à leur réduction.

## Conclusion et perspectives

L'émergence de la méthode géodésique de contrainte du déséquilibre énergétique planétaire, observé via l'élévation du niveau de la mer, répond aux lacunes de systèmes d'observation antérieurs. Ces travaux confirment que l'élévation du niveau de la mer est l'application la plus exigeante de la géodésie (*National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, 2020). Au-delà du strict périmètre de cet article consacré au déséquilibre énergétique planétaire et à sa mesure par géodésie spatiale, des perspectives de plusieurs ordres sont à mentionner.

Sur le plan scientifique, les efforts de réduction des incertitudes de la méthode

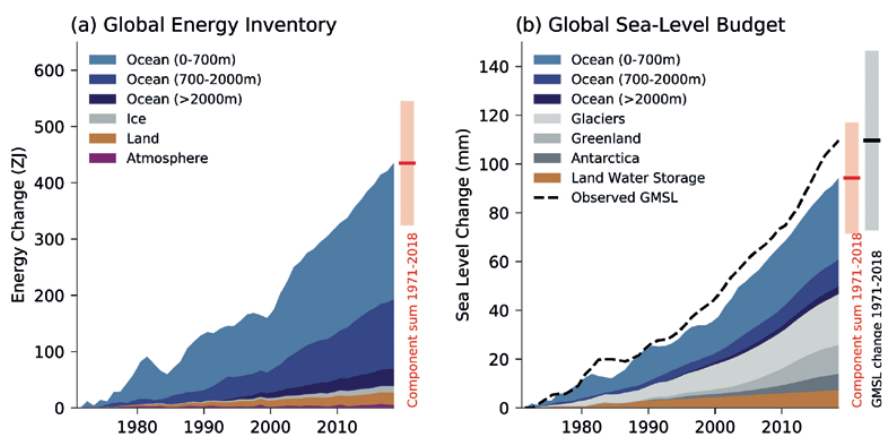
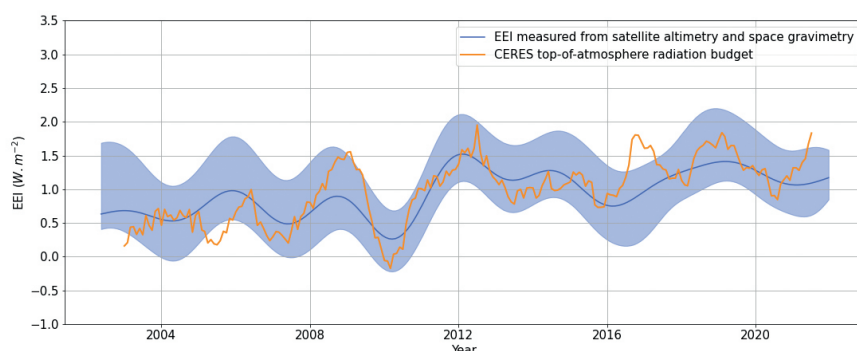


Figure 3. Inventaire des quantités de chaleur absorbées par les compartiments du système climatique (gauche). Inventaire des contributions à l'élévation du niveau de la mer (droite).





**Figure 4.** Déséquilibre énergétique planétaire par la méthode géodésique (bleu) avec intervalle de confiance à 90 %, et son équivalent radiatif mesuré au sommet de l'atmosphère par CERES (orange). Figure adaptée de (Marti et al., 2022) avec la permission des auteurs.

géodésique de mesure du déséquilibre énergétique planétaire permettent d'envisager la mise en place d'un système d'observation géodésique spécialement conçu à cette fin. L'amélioration de la contrainte sur le bilan d'énergie planétaire entrevue par la méthode géodésique ouvre la possibilité de tester les théories fondamentales du bilan d'énergie et de quantifier la réponse du système climatique aux émissions de gaz à effet de serre et ses variations temporelles (Chenal et al., 2022, Meyssignac et al., 2023a,c).

Cette perspective scientifique forme le socle pour envisager un rôle pour la géodésie au service des politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. En permettant de suivre la trajectoire climatique effectivement suivie par la Terre par l'intermédiaire du déséquilibre énergétique planétaire, elle répond aux besoins des politiques d'atténuation du changement climatique (comment le système climatique répond-il aux émissions de gaz à effet de serre ?) ; en permettant de contraindre l'ampleur de la réponse du système climatique aux émissions de gaz à effet de serre, elle s'inscrit dans la réponse aux besoins des politiques d'adaptation aux effets du changement climatique (quelle est l'amplitude des impacts à venir du changement climatique ?). ●

## Contacts

**Jonathan Chenal**, Direction des programmes, IGN, Ramonville-Saint-Agne, jonathan.chenal@ign.fr

**Benoît Meyssignac**, Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales

(Université de Toulouse, CNRS, CNES, IRD), Toulouse, Benoit.Meyssignac@cnes.fr

## Références

**Barnoud, Anne, et al. (2021)** "Contributions of altimetry and Argo to non closure of the global mean sea level budget since 2016." *Geophysical Research Letters* 48.14: e2021GL092824.

**Blazquez, A., et al. (2018).** *Exploring the uncertainty in GRACE estimates of the mass redistributions at the Earth surface: implications for the global water and sea level budgets.* *Geophysical Journal International*, 215(1), 415-430.

**Chenal, Jonathan, et al. (2022)** "Observational Constraint on the Climate Sensitivity to Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations Changes Derived from the 1971-2017 Global Energy Budget." *Journal of Climate* 35.14 : 4469-4483.

**Forster, P., et al. (2021)** "The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity". In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923-1054, doi: 10.1017/9781009157896.009.

**Fox-Kemper, B., et al. (2021)** "Ocean, Cryosphere and Sea Level Change". In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211-1362, doi: 10.1017/9781009157896.011.

**Guérou, Adrien, et al. (2023)** "Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated measurement uncertainty." *Ocean Science* 19.2 : 431-451.

**Loeb, Norman G., et al. (2018)** "Clouds and the earth's radiant energy system (CERES) energy balanced and filled (EBAF) top-of-atmosphere (TOA) edition-4.0 data product." *Journal of Climate* 31.2 : 895-918.

**Marti, Florence, et al. (2022)** "Monitoring the ocean heat content change and the Earth energy imbalance from space altimetry and space gravimetry." *Earth System Science Data* 14.1 : 229-249.

**Meyssignac, Benoît, et al. (2023a)** "Time-variations of the climate feedback parameter are associated with the Pacific Decadal Oscillation." *Communications Earth & Environment* 4.1 : 241.

**Meyssignac, Benoît, et al. (2023b)** "How accurate is accurate enough for measuring sea-level rise and variability." *Nature Climate Change* 13.8 : 796-803.

**Meyssignac, Benoît ; et al. (2023c)** "Mesurer le déséquilibre énergétique de la planète pour évaluer la sensibilité du climat aux émissions de gaz à effet de serre". *La Météorologie*, 122, 23-30. 10.37053/lameteorologie-2023-0069

**National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2020).** "Evolving the Geodetic Infrastructure to Meet New Scientific Needs". Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25579>.

## ABSTRACT

Anthropogenic greenhouse gases emissions create a difference at the top of the atmosphere between the incoming solar flux received by the Earth and the outgoing infrared flux emitted by the Earth, coined "Earth energy imbalance": this difference which corresponds to the additional energy stored by the climate system is responsible for global warming. Since about 90% of global warming is absorbed by the ocean, the Earth energy imbalance is the cause of one important contribution to sea level rise. Difficult to measure directly with radiometry, the Earth energy imbalance can be derived from the geodetic measurement of its contribution to sea level rise. This geodetic method can help constraint the Earth energy budget dynamics which further enable to better anticipate the consequences of climate change.