

PERSPECTIVE - **ACCÈS LIBRE**

## Une perspective du changement climatique à partir du déséquilibre énergétique de la Terre

Pour citer cet article : Kevin E Trenberth et Lijing Cheng 2022 *Environ. Res : Climat* 1 013001

Consultez l'[article en ligne](#) pour connaître les mises à jour et les améliorations.

# ENVIRONMENTAL RESEARCH CLIMATE

## PERSPECTIVE



ACCÈS OUVERT

REÇU  
2 mars 2022REVISÉ  
20 avril 2022ACCEPTÉ POUR PUBLICATION  
13 mai 2022PUBLIÉ  
4 juillet 2022

# Une perspective du changement climatique à partir du déséquilibre énergétique de la Terre

**Kevin E Trenberth<sup>1,2,\*</sup> et Lijing Cheng<sup>3</sup>**<sup>1</sup> National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, États-Unis d'Amérique<sup>2</sup> Université d'Auckland, 127A Churchill Road, Rothesay Bay, Auckland 0630, Nouvelle-Zélande<sup>3</sup> Institut de physique atmosphérique, Académie chinoise des sciences, Pékin, République populaire de Chine

\* Auteur à qui toute correspondance doit être adressée.

Courriel : [trenbert@ucar.edu](mailto:trenbert@ucar.edu)**Mots clés :** rayonnement solaire absorbé, rayonnement à grandes ondes sortant, déséquilibre énergétique de la Terre, contenu thermique des océans, changement climatique, températures terrestres.Contenu original de  
cette œuvre peut être  
utilisée selon les termes de  
laLicence Creative  
Commons Attribution  
4.0.Toute distribution  
ultérieure de ce travail  
doit maintenir  
l'attribution à l'auteur ou  
aux auteurs et le titre du  
travail, la citation du  
journal et le DOI.

## 1. Le réchauffement de la Terre

La Terre se réchauffe du fait des activités humaines, principalement en raison de l'augmentation du dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère qui réduisent le rayonnement infrarouge sortant de la planète qui s'échappe vers l'espace. Cela crée un déséquilibre énergétique au sommet de l'atmosphère (TOA) appelé déséquilibre énergétique de la Terre (EEI). Il en résulte un réchauffement de la planète, qui se manifeste de multiples façons, dont une seule est l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe (TMSG) (figure 1). Cette dernière a été le principal point de mire du suivi du réchauffement climatique et 2021 a été classée comme la cinquième ou la sixième plus élevée jamais enregistrée, mais les huit années les plus chaudes ont toutes eu lieu depuis 2013 (figure 1).

L'IEE est sans doute la mesure la plus importante liée au changement climatique. Il est le résultat net de tous les processus et rétroactions en jeu dans le système climatique. Cependant, il est également important de reconnaître les composantes du rayonnement au niveau du TOA, le rayonnement solaire absorbé (ASR) et le rayonnement net sortant à grande longueur d'onde (OLR). Le RAS est le rayonnement entrant net après prise en compte du rayonnement réfléchi et varie en fonction des nuages. L'IEE net correspond à l'ASR-OLR. L'une des principales raisons de cette répartition est liée à la géo-ingénierie proposée, en particulier, appelée gestion du rayonnement solaire (SRM), un nom euphémique s'il en est (Trenberth 2022). La SRM modifie les RAS alors que le problème est le piégeage des RLO. Entre les deux, il y a tous les systèmes météorologiques et le cycle hydrologique.

La chaleur radiative est diversement transférée en chaleur sensible (liée aux températures), en énergie latente (liée aux changements de phase de l'eau), en énergie potentielle (liée à la gravité et à la hauteur) et en énergie cinétique (liée au mouvement). La richesse des phénomènes et des transformations entre ces diverses formes d'énergie est ce qui rend ce problème à la fois difficile et intéressant sur le plan scientifique.

Il n'est pas (encore) possible de mesurer directement l'IEE, bien que les changements mesurés à partir de satellites soient considérés comme fiables, bien que biaisés. La seule façon pratique d'estimer l'IEE net est de dresser un inventaire des changements d'énergie.

## 2. Évaluation de l'IEE

Dans notre évaluation de l'IEE, nous nous concentrons sur la période bien observée de 2005 à 2019 (voir section 3). L'IEE est d'environ 460 TW ou globalement de  $0,90 \pm 0,15 \text{ W m}^{-2}$  (Trenberth 2022). Ce chiffre peut être comparé aux RAS et RLO nets d'environ  $240 \text{ W m}^{-2}$  comme une estimation de l'énergie de transit. Par conséquent, l'IEE est très faible et ne peut être directement discerné ou mesuré. Néanmoins, elle est très importante comparée aux influences humaines directes estimées, telles que l'électricité totale produite dans le monde (environ 5,7 TW en 2018) (Trenberth 2022).

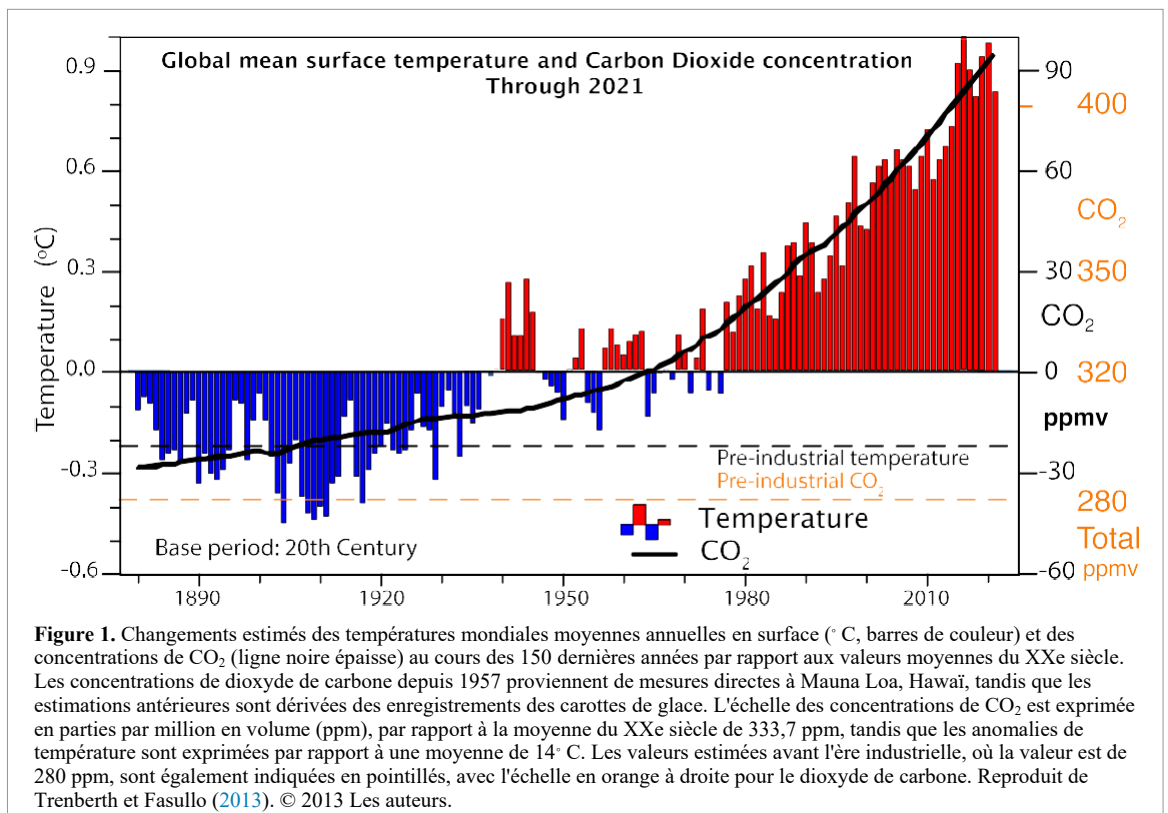
Environ 93 % de la chaleur supplémentaire provenant de l'IEE se retrouve dans l'océan sous la forme d'une augmentation du contenu thermique de l'océan (CTH). En 2022, le contenu thermique des océans était le plus élevé jamais enregistré (Cheng *et al.*, 2022) et le signal de réchauffement global dans le contenu

IOP Publishing  
thermique des  
océans est  
important par  
rapport à la  
variabilité  
naturelle,

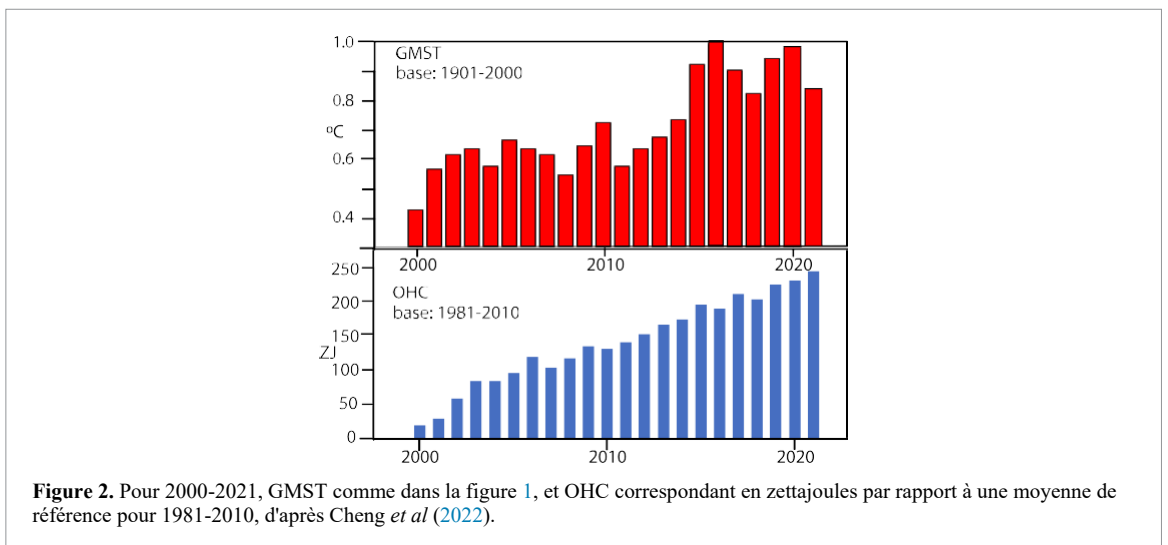
*Environ. Res. : Climate* **1** (2022) 013001

<https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6f74>

contrairement au TSMG, de sorte que les tendances du contenu thermique des océans peuvent être détectées en quatre ans (Cheng *et al.*, 2018), voir la figure 2 par exemple. Le deuxième meilleur rapport signal/bruit se trouve dans l'élévation du niveau de la mer (SLR), car environ 40 % provient de l'OHC et de l'expansion associée de l'océan, tandis que le reste provient principalement de la fonte des glaces terrestres : glaciers, Groenland, Antarctique qui déverse plus d'eau dans l'océan.



CC BY-NC-ND 3.0.



Pour le SLR, la détection de la tendance se produit en cinq ans environ, tandis que pour le GMST, la détection de la tendance nécessite plus de deux décennies (Cheng *et al* 2018).

En moyenne, près de 3 % de l'IEE va dans la fonte des glaces et 4 % dans l'augmentation des températures des terres et la fonte du pergélisol, tandis que moins de 1 % reste dans l'atmosphère. Les changements de TSM sont liés à ceux qui se produisent sur terre et aux températures de surface de la mer (TSM) dans l'océan, et l'augmentation de la TSM (figure 1) en est la conséquence. Les principales raisons de ces distributions de chaleur excédentaire sont liées à la capacité thermique de ces composants du système climatique, à la chaleur spécifique de l'eau par rapport à celle de la terre par rapport à celle de l'air, et aux masses impliquées ; voir Trenberth (2022) pour une revue complète.

Cependant, l'excès d'énergie initial a des effets profonds et des impacts importants tout au long de son parcours jusqu'à sa destination. L'énergie radiative est principalement absorbée à la surface où elle contribue à augmenter l'évaporation et l'humidification de l'atmosphère, et est finalement réalisée sous forme de chauffage latent de l'atmosphère lors des précipitations. Le cycle hydrologique s'en trouve revigoré. Dans les régions où il ne pleut pas, il entraîne une augmentation de l'assèchement puis du réchauffement, ce qui accroît le risque de vagues de chaleur et d'incendies de forêt sur terre. Il accroît

l'intensité des sécheresses. L'humidité évaporée, transportée par l'atmosphère, converge vers les tempêtes et les systèmes frontaux associés, où elle augmente les taux de précipitations, ce qui accroît le risque d'inondation sur terre. La chaleur latente libérée peut également

intensifier certains systèmes météorologiques tels que les ouragans et la convection (orages). L'air plus chaud et plus humide est plus flottant et, aidé par de nombreux phénomènes météorologiques, il s'élève et se dilate dans les basses pressions et se refroidit de manière adiabatique, puis s'étend à des milliers de kilomètres et se réchauffe en s'affaissant, redistribuant ainsi l'énergie souvent vers des régions plus élevées et plus sèches où elle peut rayonner vers l'espace.

En général, tous les composants du système climatique réagissent au réchauffement en essayant de se débarrasser de l'excès de chaleur d'une manière ou d'une autre. La méthode la plus efficace à l'échelle mondiale est le refroidissement radiatif, car des températures plus élevées augmentent le rayonnement par la quatrième puissance de la température absolue. De plus, le réchauffement inégal entraîne des gradients qui provoquent des instabilités dans l'atmosphère (convectives, baroclines) et le mélange est omniprésent. Dans l'océan, les eaux plus chaudes et moins salées sont moins denses, et des circulations thermohalines peuvent se développer, bien que la plupart des courants océaniques soient alimentés par les vents. Dans la glace et sur la terre ferme, l'énergie peut être redistribuée par des flux d'eau ou par conduction, mais cette dernière est un processus très inefficace.

Dans l'océan, le réchauffement se produit du haut vers le bas ; l'eau chaude au-dessus de l'eau froide est une configuration stable, de sorte que la stabilité et la stratification de l'océan augmentent (Li *et al* 2020). Alors qu'au niveau mondial, les TSMG et les TSM ont clairement augmenté depuis les années 1970 environ (figure 1), pour les couches océaniques plus profondes, il existe un retard qui augmente avec la profondeur. À l'échelle mondiale, les 500 premiers mètres de l'océan se réchauffent clairement depuis 1980, les 500 à 1000 mètres de profondeur depuis 1990, les 1000 à 1500 mètres depuis 1998, et les 1500 à 2000 mètres depuis 2005 (Cheng *et al* 2021). En effet, la pénétration de la chaleur est un défi majeur pour les modèles climatiques, car elle dépend de processus non résolus à une échelle inférieure à la maille, comme le mélange et la convection, et de la façon dont le mélange des marées est inclus ou non. Une vérification préliminaire des modèles CMIP6 révèle un réchauffement trop important de l'océan profond (diffusion trop importante) mais un réchauffement trop faible des couches indiquées ci-dessus. Cette redistribution de la chaleur de l'océan est un facteur de la sensibilité climatique des modèles et les erreurs contribuent à un réchauffement trop important de la surface.

Le TMGM était le cinquième ou le sixième plus chaud jamais enregistré en 2021 (selon l'ensemble de données), en partie à cause des conditions La Niña qui ont duré toute l'année et dans lesquelles des conditions froides dans le Pacifique tropical influencent les modèles météorologiques du monde entier. Dans ces conditions, l'océan emmagasine de la chaleur supplémentaire, puis la libère pendant les événements El Niño, ce qui fait que les années El Niño comme 1998 et 2016 sont relativement les plus chaudes jamais enregistrées, alors que l'OHC diminue d'une quantité faible mais mesurable. Il y a également un signal dans le SLR parce que plus de pluie se produit sur l'océan dans El Niño et les sécheresses sont plus fréquentes sur la terre, tandis que plus de pluies et de neiges se produisent sur la terre dans les événements La Niña. Lors de l'événement La Niña de 2011, les pluies et les neiges abondantes, en particulier en Amérique du Nord, en Sibérie et en Australie (où elles ont fait renaître le lac Eyre), ont retiré 5 mm d'eau de l'océan mondial (Boening *et al* 2012).

La variabilité naturelle des températures de l'air de surface est beaucoup plus importante que celle des températures des océans en raison d'El Niño/La Niña et des événements météorologiques (figure 2). En ce qui concerne les océans, la variabilité naturelle qui s'ajoute au réchauffement crée localement des points chauds, parfois appelés "vagues de chaleur marines", qui varient d'une année à l'autre mais sont en augmentation (Tanaka *et al* 2022). Ces points chauds ont une profonde influence sur la vie marine, du minuscule plancton aux poissons, en passant par les mammifères marins et les oiseaux de mer. D'autres points chauds finissent par entraîner une plus grande activité dans l'atmosphère, comme les ouragans (Trenberth *et al* 2018), qui retirent alors la chaleur de l'océan, même si une partie est également mélangée en profondeur.

Les cinq océans se réchauffent (Cheng *et al* 2022), le réchauffement le plus important étant celui de l'océan Atlantique et de l'océan Austral entourant l'Antarctique. Cette situation est préoccupante pour la glace de l'Antarctique, car les eaux plus chaudes peuvent s'infiltrer sous les plates-formes de glace de l'Antarctique, les amincir et provoquer le vêlage d'énormes icebergs.

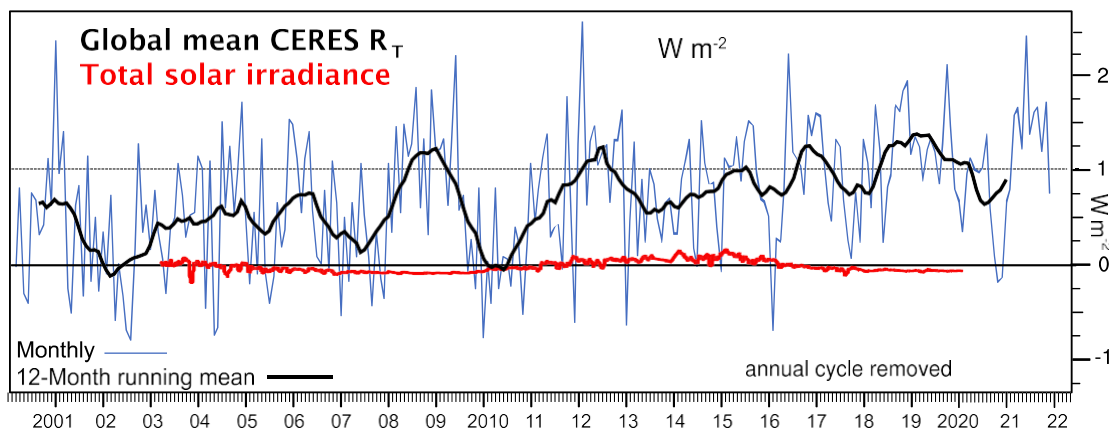
### 3. Observations de l'IEE

Dans quelle mesure l'IEE est-il connu et est-ce important ? La discussion ci-dessus montre qu'elle est très importante. Il est essentiel de connaître la quantité d'énergie supplémentaire qui affecte les systèmes météorologiques et les précipitations pour comprendre l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes. En outre, étant donné que ces phénomènes météorologiques déplacent l'énergie et aident le système climatique à se débarrasser de l'énergie en la rayonnant dans l'espace, ces processus ont également

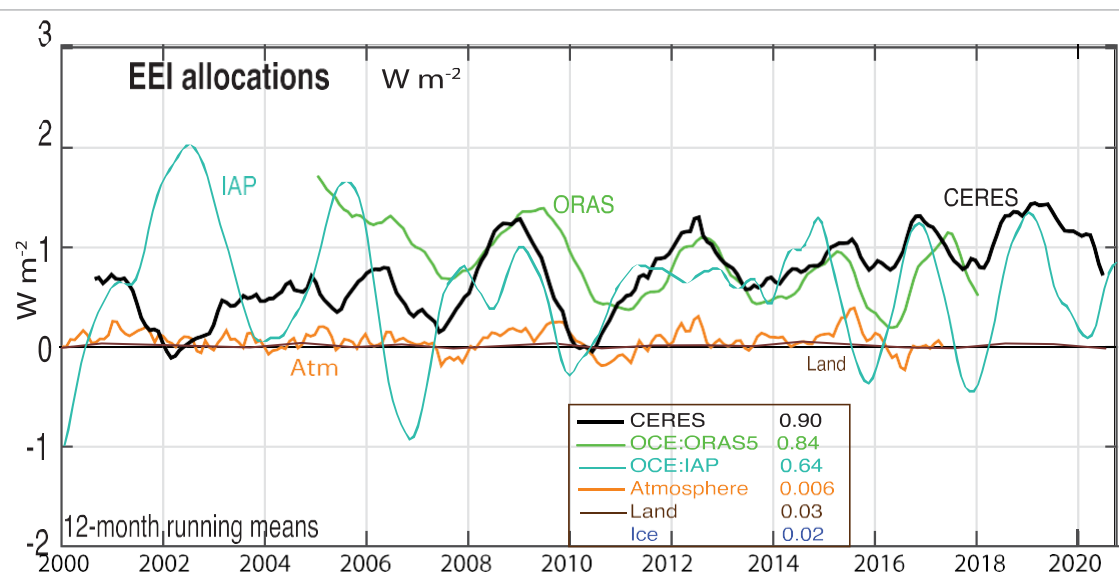
une incidence sur l'augmentation du TMSM. En d'autres termes, ils influent sur la nature et l'ampleur du changement climatique et ont des répercussions majeures sur la modélisation et la prévision des résultats.

La prévision du climat repose sur des modèles complets du système terrestre qui comprennent des modules pour l'atmosphère, les océans, les terres et la cryosphère. Dans l'atmosphère, ces modèles sont utilisés pour la prévision numérique du temps (PNT). Ils sont aujourd'hui assez sophistiqués et permettent des prévisions fiables une dizaine de jours à l'avance, après une analyse complète des observations atmosphériques continues (plus de 200 millions par jour ; NOAA 2022) utilisant l'assimilation de données quadridimensionnelles. Au-delà de ce délai, les éléments chaotiques détruisent les prévisions déterministes, mais le climat peut être projeté grâce à la connaissance des interactions avec les terres, les océans et les glaces, qui sont les principaux réservoirs d'énergie.

Il existe de bonnes estimations des variations du rayonnement TOA provenant de Clouds and Earth's Radiant Energy System (CERES) (Loeb *et al* 2018) depuis mars 2000 (figure 3). La calibration exacte n'est pas bien connue en raison de questions sur l'échantillonnage, en particulier les nuages, mais on pense que les changements tout au long de la série chronologique sont raisonnablement fiables. Dans la figure 3, le zéro est fixé sur la base des estimations de l'OHC (Loeb *et al* 2018). Il existe une tendance apparente dans l'IEE de CERES (Loeb *et al* 2021) de  $0,4 \text{ W m}^{-2} \text{ décennie}^{-1}$  pour mars 2000-décembre 2021.



**Figure 3.** Série chronologique mensuelle du rayonnement net CERES EBAF Ed4.1 au TOA (positif vers le bas) par rapport à une moyenne estimée de  $0,7 \text{ W m}^{-2}$  pour 2000-2015 (voir Loeb *et al* (2018)) (bleu). Le cycle annuel moyen est supprimé, et la ligne noire épaisse correspond à l'évolution de la température de l'eau. Moyenne courante sur 12 mois (inclut les données jusqu'en 2021). La contribution totale de l'irradiance solaire est en rouge (mise à jour, voir Coddington *et al* (2016)) avec la moyenne ( $1361 \text{ W m}^{-2}$ ) enlevée, et convertie en un forçage radiatif en divisant par 4 et en multipliant par 0,7 pour tenir compte de l'albédo.



**Figure 4.** Série temporelle des moyennes courantes sur 12 mois du rayonnement TOA de CERES (noir) ainsi que du changement total d'énergie atmosphérique (orange), de l'estimation des terres (brun) et des changements du contenu thermique de l'océan provenant de deux sources (vert et bleu clair). L'encadré donne les valeurs moyennes de toutes les composantes, y compris les terres (marron) et la glace (bleu) en  $\text{W m}^{-2}$  pour 2005-2019. La fine ligne noire correspond à zéro. Mis à jour à partir de Trenberth (2022).

Cette tendance est principalement due à une augmentation de l'ASR associée à une diminution de la réflexion par la réduction de la glace de mer arctique, ainsi qu'à des changements dans les nuages, à une réduction des aérosols et à une augmentation des GES.

Le Soleil est souvent invoqué comme une source possible de changement climatique, mais les contributions des changements du Soleil (figure 3) sont très faibles. Toute l'énergie provenant des océans, des terres et de la glace doit passer par l'atmosphère pour atteindre le TOA, et l'écart-type du rayonnement net moyen annuel du TOA est environ trois fois supérieur à celui de la tendance de l'énergie atmosphérique (figure 4), ce qui montre que ce n'est pas tant l'énergie ou les températures atmosphériques que les nuages qui sont à l'origine de la variabilité du TOA (Trenberth (2022) pour plus de détails).

Il existe de nombreuses estimations de l'IEE. Trenberth *et al* (2009) ont fait une estimation basée sur l'énergie atmosphérique et les flux de surface. Trenberth (2009) a estimé les contributions d'autres composants du système climatique, ce qui a été fait de manière plus approfondie par Hansen *et al* (2011), et von Schuckmann *et al* (2016) ont fourni un bon examen des questions en suspens.

Les changements de l'énergie atmosphérique sont bien connus (figure 4) grâce aux réanalyses atmosphériques. Pour les terres, il n'existe pas de telles séries temporelles, sauf à la surface, où l'extrême



hétérogénéité de la surface terrestre en termes de topographie, de roches, de sol, de végétation et de répartition de l'eau constitue un défi majeur. Les estimations approximatives du réchauffement global des terres sous la surface proviennent de forages réalisés à d'autres fins. Ici, une

La série chronologique pour la terre basée sur les températures de l'air à la surface de la terre pour une couche de 10 m est estimée. La valeur la plus élevée est en 2015 de  $0,05 \text{ W m}^{-2}$  (figure 4).

La situation n'est que légèrement meilleure pour la glace. Il existe des séries chronologiques pour la superficie de la glace de mer et une estimation du volume de la glace de mer arctique (mise à jour de Schweiger *et al* (2011)), tandis que l'on continue à évaluer la quantité de glace restant dans les glaciers. Les valeurs maximales pour la fonte de la glace de mer de l'Arctique se situent en 2008, 2011 et 2016, à savoir  $0,03 \text{ W m}^{-2}$ . Il existe des estimations des changements au Groenland et en Antarctique par des moyens différents, mais leurs incertitudes sont suffisamment grandes pour que les barres d'erreur ne se chevauchent pas (Trenberth 2022).

La modélisation des océans a progressé et le système d'observation des océans a connu des avancées majeures au début des années 2000 avec le déploiement du réseau Argo, composé de plus de 3000 flotteurs profilés qui échantillonnent la température et la salinité dans les 2000 mètres supérieurs de l'océan. Il existe des estimations des changements de l'OHC depuis 1958, l'Année géophysique internationale, bien que les incertitudes soient importantes avant 2005. Deux ensembles de données sur l'OHC océanique ont été utilisés dans la figure 4.

ORAS5 est contraint par les observations altimétriques du niveau de la mer et des flux de surface, mais les valeurs sont trop élevées avant 2008, date à laquelle Argo a atteint une couverture complète en profondeur, et sont moins fiables après 2015, date à laquelle il est devenu opérationnel. Le jeu de données IAP présente une variabilité parasite liée à l'échantillonnage, car il ne dispose pas de la contrainte de flux de surface. Une construction préliminaire ORAS plus récente (non illustrée) correspond plus étroitement à l'IAP de 2006 à 2010.

La figure 4 présente l'inventaire estimé des valeurs moyennes pour 2005-2019. La série chronologique de la glace est trop petite pour être visible et les valeurs terrestres émergent à peine en 2015 et 2019. Idéalement, il devrait être possible d'additionner les contributions de toutes les sources et elles devraient concorder avec celles de CERES. Dans la figure 4, l'accord est raisonnable de 2010 à 2016.

La capacité à fermer le bilan énergétique TOA au-delà d'une moyenne à long terme s'améliore mais reste une limite à la possibilité d'analyser ce qui se passe dans le système climatique et pourquoi. Cependant, en utilisant des contraintes physiques, il est possible de réaliser des bilans énergétiques et des transports régionaux à des échelles de 1000 km (Trenberth et Zhang 2019). Il serait souhaitable que toutes les données soient assimilées dans un modèle global du système terrestre et que chaque composant soit initialisé, afin de fournir le point de départ des prédictions, comme cela est fait dans la PNT. De telles prédictions expérimentales pour des saisons à l'avance existent. L'échec et même l'incapacité des modèles à correspondre aux observations dans les domaines de l'océan, de la terre et de la glace démontrent leurs limites, mais les prévisions à court terme sont potentiellement une voie à suivre pour remettre en question et améliorer à la fois les modèles et les observations.

Il est essentiel de comprendre le gain net d'énergie, ainsi que la quantité et l'endroit où la chaleur est redistribuée au sein du système terrestre. Quelle quantité de chaleur pourrait être déplacée là où elle peut être expulsée de la Terre par rayonnement pour limiter le réchauffement ? En utilisant le cadre de l'IEE, les observations pertinentes et leur synthèse remettent en question les modèles et soulignent les améliorations nécessaires, mais avec des perspectives de gains importants grâce à de meilleures informations sur ce qui se passe, pourquoi et quelles sont les perspectives pour l'avenir.

## Déclaration de disponibilité des données

Toutes les données qui appuient les conclusions de cette étude sont incluses dans l'article (et tout fichier d'information supplémentaire).

## Remerciements

Merci à John Fasullo pour le traitement des données CERES EBAF Ed4.1, disponibles sur <https://ceres.larc.nasa.gov/data/>. Le NCAR est parrainé par la National Science Foundation des États-Unis.

## ORCID iDs

Kevin E Trenberth

## Références

- Boening C, Willis J K, Landerer F W, Nerem R S et Fasullo J T 2012 The 2011 La Niña : so strong, the oceans fell *Geophys. Res. Lett.* **39** L19602
- Cheng L *et al* 2021 Les températures de l'océan supérieur ont atteint un niveau record en 2020 *Adv. Atmos. Sci.* **38** 523-30
- Cheng L *et al* 2022 Another record : ocean warming continues through 2021 despite La Niña conditions *Adv. Atmos. Sci.* **39** 373-85
- Cheng L, Trenberth K E, Fasullo J, Abraham J, Boyer T P, von Schuckmann K et Zhu J 2018 Taking the pulse of the planet *Eos* **99** 14-16
- Coddington O, Lean J L, Pilewskie P, Snow M et Lindholm D 2016 A solar irradiance climate data record *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **97** 1265-82
- Hansen J, Sato M, Kharecha P et von Schuckmann K 2011 Déséquilibre énergétique de la Terre et implications *Atmos. Chem. Phys.* **11** 13421-49
- Li G, Cheng L, Zhu J, Trenberth K E, Mann M E et Abraham J P 2020 Increasing ocean stratification over the past half century *Nat. Clim. Change* **10** 1116-23

- Loeb N G, Doelling D R, Wang H, Su W, Nguyen C, Corbett J G, Liang L, Mitrescu C, Rose F G et Kato S 2018 Clouds and the Earth's radiant energy system (CERES) energy balanced and filled (EBAF) top-of-atmosphere (TOA) edition-4.0 data product *J. Clim.* **31** 895-918
- Loeb N G, Johnson G C, Thorsen T J, Lyman J M, Rose F G et Kato S 2021 Les données satellitaires et océaniques révèlent une augmentation marquée du taux de réchauffement de la Terre *Geophys. Res. Lett.* **48** e2021GL093047
- NOAA 2022 *Weather Forecasting* (disponible à l'adresse : [www.noaa.gov/education/resource-collections/weather-atmosphere/weather-observations#:~:text=Chaque%20jour%20dans%20les%20États-Unis,des%20de%20observateurs%20volontaires%20formés](http://www.noaa.gov/education/resource-collections/weather-atmosphere/weather-observations#:~:text=Chaque%20jour%20dans%20les%20États-Unis,des%20de%20observateurs%20volontaires%20formés))
- Schweiger A, Lindsay R, Zhang J, Steele M, Stern H et Kwok R 2011 Uncertainty in modeled arctic sea ice volume *J. Geophys. Res.* **116** C00D06
- Tanaka K R, van Houtan K S et deCastro M 2022 La normalisation récente des extrêmes historiques de chaleur marine *PLoS Clim.* **1** e0000007
- Trenberth K E 2009 Un impératif pour la planification du changement climatique : suivre l'énergie globale de la Terre *Curr. Opin. Environ. Sustain.* **1** 19-27
- Trenberth K E 2022 *The Changing Flow of Energy Through the Climate System* (Cambridge : Cambridge University Press) p 319
- Trenberth K E, Cheng L, Jacobs P, Zhang Y and Fasullo J 2018 Hurricane Harvey links to ocean heat content *Earths Future* **6** 730-44
- Trenberth K E and Fasullo J T 2013 An apparent hiatus in global warming ? *L'avenir de la Terre* **1** 19-32
- Trenberth K E, Fasullo J T et Kiehl J 2009 Earth's global energy budget *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **90** 311-24
- Trenberth K E et Zhang Y 2019 Observed inter-hemispheric meridional heat transports and the role of the Indonesian throughflow in the Pacific Ocean *J. Clim.* **32** 8523-36
- von Schuckmann K *et al* 2016 Le déséquilibre énergétique de la Terre : un impératif de surveillance *Nat. Clim. Change* **6** 138-44