

# Ralentissement de l'accroissement de la température globale de surface et accélération de la fonte des glaces<sup>1</sup>.

André Berger, Qiuzhen Yin, Hervé Nifenecker, Jean Poitou<sup>2</sup>

## Éléments clé :

- notre analyse des enregistrements portant sur le climat et sur la glace montre qu'il y a un ralentissement du rythme d'augmentation de la température globale de surface et une accélération de la fonte de glace pour la période 2002-2011 par rapport à 1992-2001, les deux phénomènes étant statistiquement significatifs au niveau 5%.
- Les énergies impliquées dans ces deux processus sont du même ordre de grandeur, indiquant une redistribution de la chaleur dans le système atmosphère-cryosphère.

**Résumé** Bien que les récentes décennies aient été les plus chaudes depuis 1850, et que les températures globales moyennes de 2015 et 2016 aient battu tous les records des mesures instrumentales, le rythme de croissance de la température globale de surface (GSAT) a diminué de façon importante au début du 21<sup>e</sup> siècle. Dans ce contexte, nous examinons les rôles de la fonte de la glace et de l'augmentation associée de la masse d'eau de mer, ces deux facteurs ayant connu une augmentation importante au moment où le réchauffement se ralentissait. Précisément, nous montrons que (1) le ralentissement du rythme d'augmentation de la GSAT entre les périodes 1992-2001 et 2001-2011 s'observe dans les trois enregistrements de températures que nous avons analysés ; significatif au niveau 5%, valant entre 0,029 et 0,036 °C/an il laisse disponible une énergie de 14,8 -18,4 10<sup>19</sup> J/an ; (2) l'augmentation de la fonte de la glace liée à l'atmosphère entre ces deux périodes vaut 316 Gt/an ce qui requiert 10,5 10<sup>19</sup> J/an, c'est-à-dire de 57% à 71% de l'énergie restante du fait du ralentissement ; (3) le bilan en énergie montre donc que la chaleur requise pour faire fondre les 316 Gt/an de glace supplémentaires est du même ordre de grandeur que l'énergie qu'il aurait fallu pour réchauffer autant l'atmosphère pendant la décennie 2002-2011 que pendant la décennie précédente, ce qui s'apparente à une redistribution de chaleur au sein du système atmosphère-cryosphère.

**Présentation synthétique** Bien que la dernière décennie soit la plus chaude observée depuis le début des mesures instrumentales et bien que le CO<sub>2</sub> continue à croître, la température globale de surface n'a pas augmenté autant qu'auparavant durant les dernières 10-15 années, conduisant à un soi-disant hiatus, ou ralentissement du réchauffement. Il s'agit d'un événement fondamental pour lequel il n'y a pas encore d'explication définitive, quoique de nombreuses causes possibles aient été présentées. Ici, nous prenons en compte les phénomènes quasi simultanés qui se sont produits au début du 21<sup>e</sup> siècle : une accélération de la disparition de la banquise estivale dans l'Arctique, une accélération de la fonte des calottes glaciaires et des glaciers, une accélération de l'élévation du niveau de la mer, et la survenue d'un fléchissement de la tendance au réchauffement de l'atmosphère. Nos calculs, qui reposent sur trois enregistrements de données climatiques, montrent que l'énergie laissée par l'atmosphère du fait du ralentissement du réchauffement est à peu près équivalente à l'énergie nécessaire à la fonte des glaces observée sur la même période. Alors que la quantité de chaleur contenue dans l'atmosphère seule se stabilise après 2002, on n'observe pas de stabilisation si on y ajoute la chaleur liée à la fonte de la glace, un indice d'une redistribution de la chaleur au sein du système atmosphère-cryosphère.

---

1 NdT : Traduction de "Slowdown of global surface air temperature increase and acceleration of ice melting" publié dans *Earth's Future*, Vol 5, N° 7, p811–822, 2017 <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017EF000554/full>

2 André Berger et Qiuzhen Yin sont au Geroges Lemaître Centre for Earth and Climate Research, Earth and Life Institute, Université Catholique de Louvain, Louvain la Neuve, Belgique ; Hervé Nifenecker et Jean Poitou sont membres de l'association "Sauvons le Climat", Paris, France

# 1. Introduction : le ralentissement du rythme d'augmentation de la température globale annuelle moyenne de l'air en surface (GSAT).

La température globale annuelle moyenne de l'air à la surface de la Terre (*global annual mean surface air temperature - GSAT*) a augmenté au cours des 2 derniers siècles, chacune des trois dernières décennies ayant été plus chaude que toutes les décennies qui l'ont précédée [Stocker et al., 2013]. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) attribue le réchauffement global en premier lieu aux émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'utilisation des combustibles fossiles et en second lieu aux changements nets dans l'utilisation des sols. Bien que la dernière décennie soit la plus chaude depuis le début des enregistrements de mesures instrumentales, qui remontent à 1850 [WMO, 2015], et que le CO<sub>2</sub> continue à croître (pour atteindre plus de 400 parties par million en volume (ppmv) en 2015 Tans et Keeling, 2014) on observe comme un ralentissement ou un hiatus du rythme d'accroissement de la GSAT entre 2000 et 2012 [Keenlyside et al., 2008; Easterling and Wehner, 2009; Hansen et al., 2010; Yan et al., 2016]. Le GIEC [Stocker et al., 2013] rapporte une élévation de la GSAT de 0,26°C/décennie durant la période 1984-1998 et de 0,05 °C/décennie durant la période 1998-2012, soit une diminution de 0,21°C/décennie. Les GSAT exceptionnelles de 2015 et 2016 semblent avoir mis fin au hiatus [Hansen et al., 2017]. Cependant, la réalité de ce ralentissement du rythme d'accroissement de la GSAT a été beaucoup discutée. Une analyse détaillée des définitions du hiatus et des différents ensembles de données [Medaugh et al., 2017] a tenté de "lever les controverses autour du hiatus dans le réchauffement global". Néanmoins, la variabilité décennale du climat reste une question importante et, à ce jour, non résolue.

Plusieurs facteurs ont été proposés comme pouvant contribuer à ce ralentissement du rythme d'augmentation de la GSAT. On peut classer les explications dans deux catégories : l'une qui est concernée par une réduction du forçage externe, l'autre qui est liée à une variabilité interne. Dans la première catégorie, on peut citer une diminution de l'activité solaire [Stauning, 2014], un accroissement de l'épaisseur optique des aérosols stratosphériques du fait d'une activité volcanique modérée [Ridley et al., 2014; Santer et al., 2014] et d'une combustion de charbon accrue en Asie [Needly et al., 2013], une moindre concentration de vapeur d'eau dans la stratosphère [Solomon, 2010], et une réduction des émissions de chlorofluorocarbone (CFC) et de méthane [Estrada et al., 2013]. Dans la deuxième catégorie, on trouve : un phénomène global dont l'origine n'est pas un forçage [Dieng et al., 2017a], une variabilité naturelle qui coïncide avec une moindre augmentation du total des forçages anthropique et naturel [Kaufmann et al., 2011], et une compensation du réchauffement d'origine anthropique par des variations naturelles du climat dans l'Atlantique et le Pacifique tropical [Keenlyside et al., 2008]. Cependant, l'explication privilégiée semble être une augmentation de l'absorption de chaleur par les océans. Les données NOAA [Levitus et al., 2012] (NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration) montrent un ralentissement du réchauffement de la couche des premiers 700 m de l'océan pendant la première décennie du 21<sup>e</sup> siècle en rapport avec le ralentissement du réchauffement de surface, par le biais du couplage océan atmosphère. Cependant, comme l'absorption globale de chaleur par l'océan (surtout dans les premiers 2000 m) n'a pas diminué de manière importante, c'est une redistribution de la chaleur dans l'océan qui doit expliquer le réchauffement moins rapide de la couche supérieure, par un transfert plus important de chaleur vers l'océan profond [Yan et al., 2016]. Les simulations issues des modèles indiquent également qu'une telle augmentation de l'absorption de chaleur par l'océan profond, en lien avec des modifications de variabilité de la circulation océanique décennale associées à des événements La Niña froids plus fréquents [Foster et Rahmstorf, 2011] pourrait être à l'origine du ralentissement du réchauffement [Meehl et al., 2011]. De même, le refroidissement de surface du Pacifique tropical oriental [Held, 2013; Kosaka et Xie, 2013; Trenberth et Fasullo, 2013], attribué à des alizés Pacifiques plus intenses [England et al., 2014] pourrait avoir provoqué

le ralentissement par une plus grande absorption de chaleur par l'océan superficiel. De plus, l'anomalie de salinité récurrente dans l'Atlantique Nord subpolaire [Cheng et Tung, 2014] pourrait avoir déclenché le transport de chaleur vers des couches plus profondes dans les océans Atlantique et Austral.

Il est vraisemblable que de la chaleur ait été ajoutée à l'océan profond pendant la dernière décennie, mais en quantifier l'ampleur reste difficile. En effet, des incertitudes dans le traitement des données ainsi que des erreurs systématiques au sein des observations ne permettent pas d'obtenir des mesures suffisamment précises [Abraham et al., 2013; Dieng et al., 2015a; Yan et al., 2016]. De plus, la dilatation thermique de l'océan a augmenté à un rythme beaucoup moins élevé depuis 2003 [Cazenave et al., 2014; Llovel et al., 2014; von Schuckmann et al., 2014; Dieng et al., 2015a], en dépit d'un biais possible vers des faibles valeurs du réchauffement de l'océan superficiel [Durack et al., 2014]. Le rythme de la dilatation était de  $1,6 \pm 0,25$  mm/an avec une hausse du niveau de la mer d'environ  $3,1 \pm 0,4$  mm/an entre 1993 et 2003 [Cazenave et al., 2009], alors qu'entre 2003 et 2012, ce rythme était tombé à environ 1 mm/an (Llovel et al. [2014] et estimé à  $0,9 \pm 0,15$  mm/an de 2005 à 2013) avec une hausse du niveau de la mer de  $3,3 \pm 0,4$  mm/an [Cazenave et al., 2014], et il est à peu près stable depuis 2004. En conséquence, la composante massique de la hausse du niveau de la mer est passée de 1,5 à 2,3 mm/an. Ainsi, la dilatation thermique de l'océan est diminuée de 0,6 mm/an alors que la composante massique augmente de 0,8 mm/an (assez proche des 0,61 mm/an de Dieng et al., 2017b), indiquant une relation entre le ralentissement du réchauffement et la fonte globale de glace. L'accumulation de chaleur dans l'océan plus profond (en dessous de 700 m) peut, cependant réduire cette contribution massique nette à la hausse du niveau de la mer à 0,4 mm/an (ceci serait le cas si, au lieu de  $2,3 \pm 0,4$  mm/an sur la période 2003-2012, l'augmentation de masse dans l'océan était de  $1,9 \pm 0,1$  mm/an comme dans Cazenave et al. (2009) pour la période 2003-2008 ; il n'y aurait même pas d'augmentation en prenant la valeur de  $1,5 \pm 0,4$  mm/an pour 2003-2013 [Purkey et al., 2014]). Enfin, nous avons conscience que la dilatation thermique dépend de la température de l'eau sujette au réchauffement aussi bien que de la quantité de chaleur ajoutée, mais il faudrait un très grand changement de température, qui n'est pas observé, pour que le coefficient de dilatation thermique change de façon significative.

Notre examen du taux de variation du réchauffement de l'air en surface au cours des périodes 1992-2001 et 2002-2011 et notre analyse de certaines composantes du bilan énergétique de la Terre indiquent qu'une redistribution partielle de l'énergie s'est produite entre l'atmosphère et la cryosphère. En conséquence, nous proposons (compte tenu des incertitudes) que le hiatus puisse s'expliquer partiellement par une distribution modifiée de l'énergie entrante et, surtout, que le rythme de réchauffement global (le rythme d'accumulation de l'énergie) soit resté constant au cours des quelques dernières décennies.

## 2. Localisation temporelle du ralentissement du rythme d'augmentation de la GSAT

Afin d'essayer de démontrer l'existence d'une pause et d'en préciser la localisation nous avons réalisé une analyse de régression (Texte S1, données supplémentaires<sup>3</sup>) sur plusieurs plages temporelles entre 1984 et 2014 en utilisant 3 jeux de données distincts (Tableau 1, Texte S2 et Tableau SM1) : HadCRUT4, Cowtan-Way et Karl et al.

Ces jeux de données sont continuellement actualisés. La médiane des 100 éléments de l'ensemble HadCRUT4.3.0.0, la version 2.0 de Cowtan-Way, la nouvelle analyse des données Karl (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/scpub201506/>) et les données moyennées<sup>4</sup> de ces trois ensembles

---

3 NdT : voir en fin d'article

4 NdT : à chaque point (chaque année) chacune des 3 séries a une valeur ; pour la série "moyennée", on affecte à ce

de données sont utilisées dans notre calcul. A partir de toutes les données et de toutes les publications disponibles, nous pouvons démontrer qu'il y a un ralentissement du rythme d'augmentation de la GSAT dans tous les ensembles de données que nous avons analysés (Tableaux 1 et SM1).

Quant à la localisation temporelle de la pause, en utilisant une double régression linéaire, notre meilleur ajustement à la totalité des ensembles de données situe son début au tournant du 21<sup>e</sup> siècle. Ainsi, le rythme du réchauffement dans HadCRUT4 est de  $0,236 \pm 0,042$  °C/décennie dans la période 1984-2002 et de  $0,008 \pm 0,049$  °C/décennie dans la période 2002-2014 (Tableau 1 et Figure 1a). Pendant la pause (2002-2014), l'hypothèse d'un rythme de réchauffement nul ne peut donc pas être exclue. De plus, la tendance des séries temporelles construites à partir de la différence des deux séries, c'est-à-dire des séries avant et après 2002, est statistiquement différente de zéro à mieux que le niveau de signification 0,01. Ceci indique que les tendances des deux suites temporelles sont significativement différentes, un résultat concomitant avec l'accélération de la fonte de glace continentale, comme nous allons le montrer. Si on prend 1998 comme année de début de la pause, on a un résultat fortement influencé par le caractère exceptionnellement chaud de l'année (avec son El Niño historiquement le plus fort) suivie par deux années plutôt fraîches avant que la température augmente de nouveau pour atteindre le plateau en 2002-2003. La tendance plus élevée de 2000-2014 ( $0,116 \pm 0,067$  °C/décennie) de la nouvelle analyse de Karl et al. s'explique au moins en partie par l'inclusion dans la série temporelle de l'année 2000, froide, et de l'année 2014, chaude. De fait, si on analyse la période 2002-2011, on trouve une tendance de  $0,018 \pm 0,078$  °C/décennie (Tableau 1). Dans des analyses de régression sur les plages 1984-1999 et 1999-2014 dans HadCRUT4, avec 1999 comme point commun aux deux périodes, la différence entre les tendances respectives de ces deux périodes disparaît (Figure SM1). Il en est de même quand on compare 1984-2000 à 2000-2014 et plus encore si on inclut 2015 et 2016. Ces considérations, ainsi que l'observation de l'accélération de la fonte des glaces, sont la raison pour laquelle nous prenons 2002 plutôt que 1998 comme année de début de la pause.

Enfin, nous avons choisi la période 2002-2011 parce qu'elle correspond à la période durant laquelle on observe nettement une pause, par rapport à l'intervalle 1992-2001. Ce choix est pertinent aussi du fait que la qualité des jeux de données mesurées a été discutée dans plusieurs publications. De plus, le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC montre que des changements importants se sont produits dans la cryosphère de la première période (1992-2001) à l'autre (2002-2011). Par conséquent, notre modèle statistique (Texte S1) montre que le rythme d'augmentation dans les GSAT de HadCRUT4 est de  $0,328 \pm 0,117$  °C/décennie de 1992 à 2001 et de  $-0,031 \pm 0,095$  °C/décennie de 2002 à 2011 ; dans les GSAT de Cowtan-Way, il est de  $0,340 \pm 0,106$  et de  $0,0396 \pm 0,0134$  °C/décennie et dans Karl, de  $0,305 \pm 0,110$  et de  $0,018 \pm 0,078$  °C/décennie, respectivement. À titre de synthèse, une analyse semblable réalisée sur les données moyennées de ces trois ensembles de données conduit à une tendance de  $0,325 \pm 0,110$  °C/décennie de 1992 à 2001 et de  $0,0086 \pm 0,089$  °C/décennie de 2002 à 2011 (Tableau 1 et Figure 1b).

---

point la moyenne des 3 valeurs.

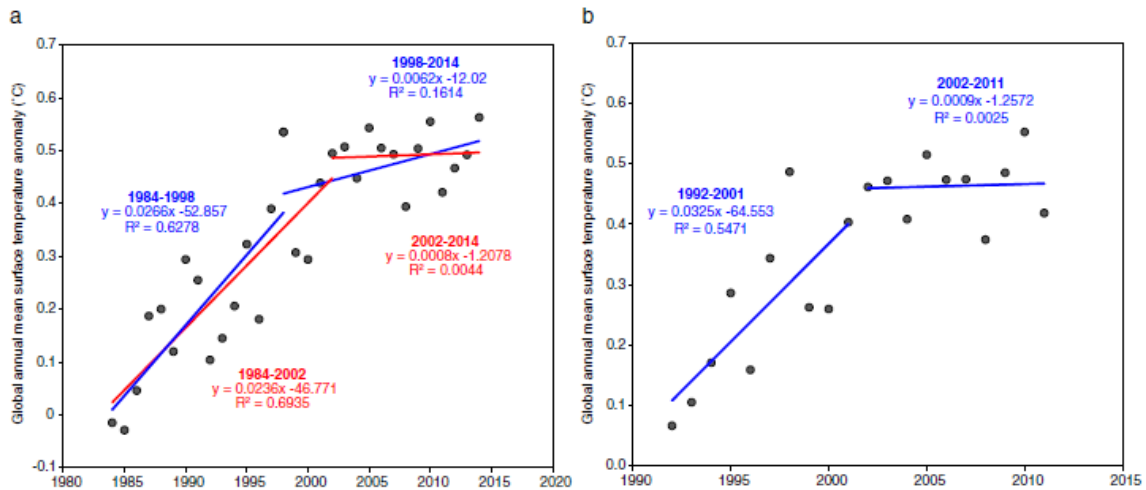


Figure 1. Augmentation de la température moyenne globale de surface (a) de 1984 à 2014 avec 1998 et 2002 comme points charnières, les anomalies de température étant tirées de HadCRUT4 [Morice *et al.*, 2012]; (b) de 1992 à 2001 et de 2002 à 2011, les données étant la moyenne des données de HadCRUT4, Cowtan et Way et Karl *et al.* Les régressions linéaires et coefficients de détermination sont indiqués.

### 3. Changements de la température, de l'énergie, et de la fonte des glaces

On peut analyser la pause de façon directe en considérant le ralentissement du rythme de croissance de la GSAT (évaluée maintenant en °C/an pour s'adapter aux données sur l'énergie et sur la glace), c'est-à-dire  $0,0359 \pm 0,0151$  °C/an (d'après HadCRUT4),  $0,0301 \pm 0,015$  (d'après Cowtan-Way), au moins  $0,0288 \pm 0,0138$  (d'après Karl *et al.*), ou  $0,0316 \pm 0,0147$  (d'après les données moyennées de ces trois ensembles de données), et en regardant s'il y a un rapport entre l'énergie laissée disponible par la pause et l'accélération de la fonte des glaces.

D'après la première loi de la thermodynamique et en supposant que l'énergie réchaufferait globalement l'atmosphère, la relation entre les variations de température  $\Delta T$  et la chaleur sensible  $\Delta Q$  peut s'écrire :

$$\Delta T = \Delta Q / (C_{pa} M_a) \text{ avec } C_{pa} = 1005 \text{ J/kg/K et } M_a = 510 \times 10^{16} \text{ kg}$$

avec  $C_{pa}$  la chaleur spécifique de l'atmosphère à pression constante et  $M_a$  la masse de l'atmosphère.

La baisse du réchauffement pendant la période 2002-2011 par rapport à 1992-2001 telle qu'estimée à partir de HadCRUT4, de Cowtan-Way, de Karl *et al.* et de la moyenne de ces ensembles de données laisserait ainsi  $18,4 \pm 7,7$ ,  $15,4 \pm 7,7$ ,  $14,8 \pm 7,1$ , ou  $16,2 \pm 7,5$   $10^{19}$  J/an disponibles (Tableau 2 et les textes S4 et S5). Avec une chaleur latente de fusion de la glace de  $334 \cdot 10^3$  J/kg, et en négligeant l'énergie nécessaire pour élever la température de la glace à son point de fusion (la chaleur spécifique de la glace n'est que de  $2,1 \cdot 10^3$  J/kg/K) une telle quantité d'énergie pourrait faire fondre respectivement  $551 \pm 231$ ,  $462 \pm 230$ ,  $442 \pm 212$  ou  $485 \pm 226$  Gt de glace (Tableau 2). Compte tenu des incertitudes, ces valeurs sont de 40 à 74% supérieures au différentiel de glace (316 Gt) en lien avec l'atmosphère, entre les périodes avant et après 2002, comme on le montre à partir des observations dans la section 4 et le tableau 3).

### 4. Fonte de glace observée

D'après ce qui est publié, la perte totale de masse de glace pendant la période 1992-2002 est estimée à un peu plus que 500 Gt/an (Tableau 3). Entre 2002 et 2011 elle est estimée à environ 1200 Gt/an (à peu près 600 provenant de glace continentale et 600 de glace de mer ; Tableau 3). En supposant

que toute cette glace a fondu avec une chaleur latente de fusion de la glace de  $334 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$ , nous pouvons conclure que  $39,91 \cdot 10^{19} \text{ J/an}$  ou 4,43% de l'énergie moyenne acquise par la Terre chaque année ( $900 \cdot 10^{19} \text{ J}$ ) aurait été consommés pour faire fondre cette glace sur la période 2002-2011. Une partie de la fonte de glace peut être due à l'atmosphère mais elle n'est pas facile à estimer.

	HadCrut4	Cowtan-Way	Karl et al.	moyenne des 3
Taux de réchauffement 2002-2011 (°C/an)	-0,0031±0,0095	0,00396±0,0134	0,0018±0,0078	0,0009±0,009
Ralentissement par rapport à 1992-2001 (°C/an)	0,0359±0,015	0,0301±0,0154	0,0288±0,0138	0,0316±0,0147
Energie manquante ( $10^{19} \text{ J/an}$ )	18,4±7,7	15,4±7,7	14,8±7,1	16,2±7,5
Equivalent en fonte de glace (Gt/an)	551±231	462±230	442±212	485±226
Equivalent en % de l'accélération de la fonte	174	146	140	153
Energie pour la fonte de la glace, en % de l'énergie manquante	55	68	71	65

La perte de masse de la calotte Groenlandaise a augmenté pendant les deux dernières décennies (Ice Sheet Mass Balance Inter-comparison Exercise, *Shepherd et al.*, 2012 ; *Forsberg et al.*, 2017) ; elle est estimée avec un haut degré de confiance à  $215 \pm 58 \text{ Gt/an}$  [*Stocker et al.*, 2013] sur la période 2001-2011 contre  $34 \pm 40 \text{ Gt/an}$  sur la période 1992-2001 (Tableau 3). En tenant compte des incertitudes, la plage totale des différences d'une période à l'autre est de  $181 \pm 70 \text{ Gt/an}$ . Il y a de bonnes raisons d'attribuer une quantité équivalente de perte à la fonte plus ruissellement et à des décharges de glaciers. L'énergie de fonte des icebergs est fournie essentiellement par l'océan et il est vraisemblable que la chaleur requise pour faire fondre la surface de la calotte de glace est fournie par l'atmosphère. En supposant que l'atmosphère est à l'origine de la moitié de la perte de masse [*Stocker et al.*, 2013], la fonte sur la période de pause de 2002 à 2011 s'élèverait à  $107 \pm 29 \text{ Gt/an}$  et la fonte supplémentaire comparée à la période 1992-2001 serait de  $90 \pm 35 \text{ Gt/an}$  (Tableau 3). Ces valeurs sont des estimations prudentes : la calotte de glace Groenlandaise pourrait perdre jusqu'aux deux tiers de sa masse dans un avenir proche [*Rignot et al.*, 2011 ; X. Fettweis, communication personnelle, 2015].

	Perte de glace		Fonte de glace due à l'atmosphère		
	1992-2001 Gt/an	2002-2011 Gt/an	% de la glace perdue	2002-2011 Gt/an	(2002-2011) – (1992-2001) Gt/an
Groenland ( <i>Stocker et al. 2013</i> )	34±40	215±58	50	107±29	90±35
Antarctique ( <i>Stocker et al. 2013</i> )	30±67	147±75	14	20±17	10±8
Glaciers ( <i>Rignot et al. 2011</i> )	173±43	240±34	100	240±34	67±55
Glace de mer arctique ( <i>PIOMAS 2016</i> )	272±60	570±55	50	285±28	149±41
Total	509±107	1172±115		652±55	316±77
Energie pour la fusion ( $10^{19} \text{ J/an}$ )	17±3,5 0,011	39,1±3,8 0,024		21,7±1,8 0,014	10,5±2,5 0,007
Energie pour la fusion ( $\text{W/m}^2$ ) % de l'énergie gagnée par la Terre ( $900 \times 10^{19} \text{ J/an}$ )		4,34		2,40	1,17

$900 \times 10^{19} \text{ J/an} = 0,56 \text{ W/m}^2$

Du fait que cette accélération de la fonte de glace dans les années 2000 pourrait éventuellement être liée à une modification de l'albédo de surface, nous avons vérifié si les dépôts de carbone suie transporté vers les hautes latitudes septentrionales par des aérosols issus de la combustion de fossiles et de biomasse avaient augmenté pendant cette période. Les mesures de *Doherty et al.* [2010] montrent que les dépôts de carbone suie sur l'Arctique ont diminué entre le milieu des années 1980 et la fin des années 2000. Il n'y a pas eu de dépôt majeur au 21<sup>e</sup> siècle avant celui du début de l'été 2012 issu des grands incendies de forêt de Sibérie et d'Amérique du Nord, qui a résulté en une fonte d'une superficie étendue de la calotte groenlandaise en juillet 2012 [*Keegan et al.*, 2014]. Ainsi, le dépôt de carbone suie peut être éliminé comme cause possible de l'accélération de la fonte observée dans l'Arctique depuis 2000. Il a été montré que des dépôts de poussière d'origine éventuellement minérale sont également susceptibles de réduire l'albédo depuis quelques années, d'après des mesures réalisées par *Dumont et al.* [2014]. Comme ils trouvent qu'une réduction importante de l'albédo ne se produit qu'après 2009, les dépôts minéraux sont également éliminés comme cause possible de l'accélération de la fonte de glace sur toute la période qui nous intéresse. Cependant, les données d'albédo de MODIS (MODerate resolution Imaging radioSpectrometer) [*Box et al.*, 2012] indiquent une importante décroissance de l'albédo en moyenne surfacique de  $-0,056 \pm 0,007$  pendant l'été de l'hémisphère nord sur la période 2000-2011. Cette perte d'albédo est due surtout à l'accroissement de la zone d'ablation (couverte par de la glace nue en été) résultant d'une modification de la circulation atmosphérique générale au cours des étés récents, celle-ci favorisant une advection d'air chaud venant du sud. L'augmentation de la température de surface renforce le métamorphisme des grains de neige dans la zone d'accumulation et, à cause d'un dépôt peu abondant de neige et de la fonte de surface induite par le réchauffement, des mares se forment sur la calotte (aussi bien que sur la banquise) diminuant de façon importante l'albédo et augmentant ainsi la fonte de glace par le biais de la rétroaction d'albédo bien documentée. De fait, la rétroaction persistante de la fonte accrue de la surface [*Box et al.*, 2012], les chutes de neige estivales inférieures à la normale [*Box et al.*, 2013] et le noircissement de la surface depuis 2009, ont contribué à une accélération de la fonte de la calotte glaciaire groenlandaise.

Il est probable que le rythme moyen de perte de glace de l'Antarctique a augmenté au cours des deux dernières décennies. Cette perte était de  $147 \pm 75$  Gt/an avec un niveau de confiance bas [*Stocker et al.*, 2013] pendant la période 2002-2011 (Tableau 3), elle était due au flux de chaleur océanique. Comparé aux  $30 \pm 67$  Gt/an de la période 1992-2001, cela représente une augmentation de  $117 \pm 101$  Gt/an. Il y a un très haut niveau de confiance que ces pertes proviennent surtout de la péninsule Antarctique du nord et du secteur de la Mer d'Amundsen de l'Antarctique de l'ouest, et un niveau élevé de confiance qu'elles résultent de l'accélération des décharges glaciaires, la fonte de surface étant actuellement négligeable en Antarctique [*Stocker et al.*, 2013]. De plus, du fait de l'importance du flux de chaleur océanique sur les modifications des plates-formes de glace la fonte de glace de surface liée à l'atmosphère durant la période de pause est finalement évaluée à seulement  $20 \pm 17$  Gt/an, et son évolution de 1992-2001 à 2002-2011 à seulement  $10 \pm 8$  Gt/an (Tableau 3).

Noter que nos valeurs de perte de glace au Groenland et dans l'Antarctique sont comparables aux estimations d'autres auteurs. Dans *Rignot et al.* [2011], l'accélération de perte de glace entre 1992 et 2009 vaut  $21,9 \pm 1$  Gt/an<sup>2</sup> pour le Groenland,  $14,5 \pm 2$  Gt/an<sup>2</sup> pour l'Antarctique et  $36,3 \pm 2$  Gt/an<sup>2</sup> pour la combinaison des deux alors que nos valeurs sont  $18 \pm 7$ ,  $12 \pm 10$  et  $30 \pm 12$  Gt/an<sup>2</sup> respectivement. Dans *Shepherd et al.* [2012] la perte totale de masse pour le Groenland et l'Antarctique vaut  $100 \pm 92$  Gt/an pour 1992 à 2000,  $298 \pm 58$  pour 2000 à 2011 et  $213 \pm 72$  pour toute la période 1992-2011. Ceci s'accorde bien avec nos valeurs ( $64 \pm 68$ ,  $362 \pm 95$  et  $213 \pm 123$  Gt/an) bien que notre incertitude soit plus grande que dans Rignot et al. (2011) et dans Shepherd et al. (2012) (noter aussi que les intervalles de temps ne sont pas strictement les mêmes).

Le déclin global des glaciers au début du 21<sup>e</sup> siècle est sans précédent [Zemp *et al.*, 2015]. À partir d'une interpolation des données fournies dans le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC et l'actualisation de Marzeion *et al.* [2012, 2017], la perte totale de masse de tous les glaciers (à l'exclusion de ceux de la périphérie des calottes) est estimée à  $240 \pm 34$  Gt/an sur la période 2002-2011. Ceci représente une augmentation de 67 Gt/an par rapport aux  $173 \pm 43$  Gt/an de la période 1992-2001. Conformément à Marzeion (communications personnelles 2015 et 2017) nous considérerons que la totalité de ces fontes est induite par le transfert d'énergie à partir de l'atmosphère (Tableau 3).

La fonte de glace est l'un des plus importants mécanismes de rétroaction caractérisant la réponse du système climat au forçage radiatif, les modifications de l'étendue de la banquise, en particulier, changeant significativement l'albédo de surface de la Terre. Il y a un niveau de confiance très élevé que l'étendue de la banquise Arctique a décliné pendant la période 1972-2012 [Comiso *et Hall*, 2014] (Figure 2, où la banquise de septembre n'est prise que comme exemple) alors que l'étendue annuelle de la banquise Antarctique a augmenté sur la période 1979-2012 [Stocker *et al.*, 2013]. Sur la période 1979-2010 l'étendue de la banquise Arctique a diminué de  $52 \times 10^3$  km<sup>2</sup>/an, le triple de l'augmentation de l'étendue de la banquise Antarctique ( $17 \times 10^3$  km<sup>2</sup>/an). Pendant ce temps, le volume de la banquise Arctique a diminué de 275 km<sup>3</sup>/an [PIOMAS, 2016], un ordre de grandeur de plus que le gain en volume de la banquise Antarctique, soit 30 km<sup>3</sup>/an [Holland *et al.*, 2014], ce gain étant compatible avec la variabilité du système climatique [Zunz *et al.*, 2013].

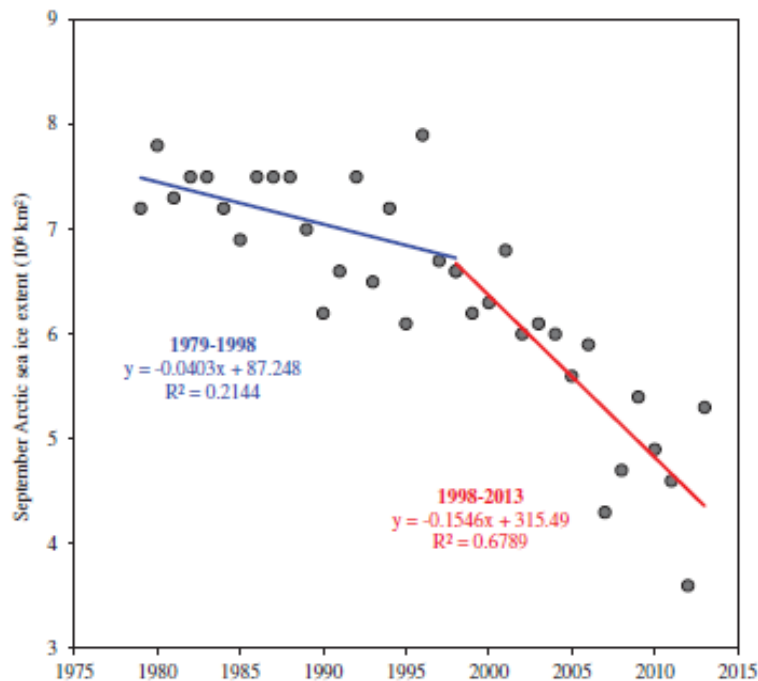


Figure 2 : Diminution de l'étendue de la banquise Arctique de septembre [Massonnet *et al.*, 2012 ; Fetterer *et al.*, 2014 ; NSIDC, 2016a] entre 1979 et 1998 et entre 1998 et 2013. Les régressions linéaires et coefficients de détermination sont indiqués.

Le cinquième rapport du GIEC note que l'étendue décennale de la banquise Arctique annuelle a diminué non seulement en été et en automne, mais à toutes les saisons, et au cours de chaque décennie successive depuis 1979 (avec un degré de confiance élevé). De plus, l'étendue de la glace Arctique pérenne et pluriannuelle a diminué avec un très haut degré de confiance entre 1979 et 2012. De la même façon que nous l'avons fait dans notre tentative de situer le ralentissement du réchauffement global (voir ci-dessus), nous avons utilisé une stratégie de régression pour localiser l'accélération de la disparition de la banquise Arctique. Comme l'illustre l'extension de la banquise en septembre (Figure 2), 1998 semble être un point de bifurcation significatif, également dans la tendance annuelle, avec la disparition de 40 300 km<sup>2</sup>/an de banquise avant 1998 et 154 600 km<sup>2</sup>/an



après. Les données de *Fetterer et al.* [2014] (et *NSIDC*, 2016a) montrent une telle diminution de la surface (étendue) de la banquise Arctique en septembre de  $4,26 (6,62) \times 10^6 \text{ km}^2$  en 1998 à  $2,16 (3,63) \times 10^6 \text{ km}^2$  en 2012 (on utilise septembre seulement pour avoir une meilleure illustration du changement de la banquise Arctique). 2001 se caractérise par une surface (étendue) de banquise exceptionnellement grande, soit  $4,56 (6,78) \times 10^6 \text{ km}^2$  mais elle est suivie par une surface (étendue) de  $4 (6) \times 10^6 \text{ km}^2$  en 2002. À partir de cette date, la diminution commence à être plus stable, au moins jusqu'à 2012 (en 2013, 2014, 2015, l'étendue de glace est  $5,35, 5,29, 4,68 \times 10^6 \text{ km}^2$  respectivement, indiquant une moindre accélération de la fonte de la banquise Arctique) La Figure 2 montre clairement que l'étendue de la banquise Arctique de septembre a commencé à diminuer plus rapidement au tournant du 20<sup>e</sup> siècle (c'est-à-dire entre 1998 et 2002). Ceci coïncide avec le début de la pause.

Non seulement la surface couverte par de la glace diminue, mais la banquise Arctique devient de plus en plus jeune, c'est-à-dire plus fine et elle fond plus facilement chaque été. La perte d'épaisseur de la banquise et sa disparition modifient considérablement le bilan des échanges d'énergie entre l'océan, la glace et l'atmosphère, ce qui pourrait donc avoir joué un rôle important dans l'accélération de la fonte de la banquise et, plausiblement dans l'existence de la pause. Des expériences réalisées avec les modèles [*Holland et al.*, 2006] montrent que "le recul de la glace s'accélère au fur et à mesure que l'amincissement augmente l'efficacité de formation d'eau libre pour un rythme donné de fonte et que la rétroaction d'albédo de la glace augmente l'absorption des rayonnements de courte longueur d'onde". Du fait qu'aux grandes échelles de temps, la surface totale de la banquise est à peu près linéairement liée à la température de l'air à la surface de l'Arctique [*Mahlstein et Knutti*, 2012], il est vraisemblable qu'il y a un seuil de température de l'air pour l'accélération de la disparition de la banquise de septembre. La formation de mares de fonte [*Polashenski et al.*, 2012 ; *Lecomte et al.*, 2014 ; *Schröder et al.*, 2014] et la rétroaction d'albédo qui y est liée pourraient être un autre facteur à l'origine d'une fonte plus rapide de la banquise Arctique au début du 21<sup>e</sup> siècle.

Les évaluations du volume de la banquise Arctique sont moins précises que celles de son étendue à cause d'incertitudes concernant l'épaisseur de la glace [*Zygmuntowska et al.*, 2014]. Cependant, des calculs reposant sur les données disponibles [*Massonnet et al.*, 2012, 2013 ; *Fetterer et al.*, 2014 ; *PIOMAS*, 2016] montrent que la perte de volume de la banquise a commencé à s'accélérer vers 1998 avec un rythme de disparition totale de  $152 \text{ km}^3/\text{an}$  pendant la période 1979-1998 à comparer à  $545 \text{ km}^3/\text{an}$  pendant la période 1999-2011. En même temps, on peut montrer que l'Arctique a perdu  $620 \pm 60 \text{ km}^3/\text{an}$  pendant la période 2002-2011 comparé à  $296 \pm 66$  de 1992 à 2001. Avec une densité de la glace de  $920 \text{ kg/m}^3$  cela donne un total de perte de masse de la banquise de  $272 \pm 60$  et  $570 \pm 55 \text{ Gt/an}$  respectivement. En Arctique, il est raisonnable de supposer que 50% de la fonte annuelle de banquise sont dus à de la chaleur transférée de l'atmosphère. En effet, les observations [*Perovich et al.*, 2014] et les modélisations [*Lecomte et al.*, 2013] montrent une fonte de surface Arctique à peu près égale en moyenne à la fonte par le fond. Sur l'ensemble de la période de pause, le total de la fonte de glace Arctique liée à l'atmosphère aurait ainsi atteint  $285 \pm 28 \text{ Gt/an}$ , ce qui représente une augmentation de  $149 \pm 41 \text{ Gt}$  par rapport à la période avant 2002 (la contribution de la fonte de banquise Antarctique est supposée négligeable).

En résumé (Tableau 3), sur la période 2002-2011,  $1172 \pm 115 \text{ Gt}$  de glace ont disparu chaque année en moyenne c'est-à-dire  $663 \text{ Gt}$  de plus que les  $509 \pm 107 \text{ Gt/an}$  sur la période 1992-2001. Considérant que cette disparition de glace est provoquée à peu près en quantités égales par l'atmosphère et par l'océan, la fonte additionnelle liée à l'atmosphère est  $316 \pm 77 \text{ Gt}$  de glace/an (Tableau 3).

La quantité d'énergie laissée disponible par l'atmosphère du fait du ralentissement du rythme d'augmentation de la GSAT, soit  $18,4 \pm 7,7 \cdot 10^{19} \text{ J/an}$  (données HadCRUT4),  $15,4 \pm 7,7 \cdot 10^{19} \text{ J/an}$  (données Cowtan-Way),  $14,8 \pm 7,1 \cdot 10^{19} \text{ J/an}$  (données Karl et al.) et  $16,2 \pm 7,5 \cdot 10^{19} \text{ J/an}$  (moyenne des

trois ensembles de données) (Tableau 2) est comparable aux  $10,5 \pm 2,5 \cdot 10^{19}$  J/an requis pour la fonte additionnelle de  $316 \pm 77$  Gt de glace/an. L'énergie associée au ralentissement du réchauffement global de surface pendant la période 2002-2011 comparé à la période 1992-2001 pourrait ainsi être liée, au moins en partie, à l'accélération concomitante de la fonte de la glace, l'énergie manquante restante étant transférée à l'océan.

## 5. Réchauffement de l'atmosphère plus fonte de glace, pas de pause sur l'ensemble

Le début du 21<sup>è</sup> siècle a connu quatre phénomènes presque simultanés : accélération de la disparition de la banquise Arctique (y compris un amincissement de son maximum annuel), augmentation du rythme de fonte des calottes et des glaciers [Zemp *et al.*, 2015], augmentation de la montée du niveau de la mer [Cazenave et Remy, 2011 ; Cazenave *et al.*, 2014] et l'apparition d'un effondrement dans la tendance au réchauffement de l'atmosphère. Ce sont les raisons pour lesquelles, en vue d'acquiescer une idée correcte du gain de chaleur de l'atmosphère, nous suggérons d'ajouter la chaleur nécessaire à la fonte des calottes, des glaciers d'altitude, et de la banquise, à l'augmentation du contenu en chaleur due à l'élévation de la température de l'atmosphère. La Figure 3 illustre la redistribution d'énergie entre l'atmosphère et la cryosphère et montre que, alors que la chaleur contenue dans l'atmosphère seule semble stable après le tournant du 21<sup>è</sup> siècle, il n'en est pas de même si on y ajoute la chaleur de fonte de la glace. En comparant avec la pente de la chaleur atmosphérique, il apparaît que l'augmentation de la fonte de glace compense la pause de l'élévation de la température de l'atmosphère et rétablit un comportement quasi-linéaire pour l'énergie totale impliquée dans le système atmosphère-cryosphère. Comme on le montre sur la Figure 3, la tendance des courbes d'énergie est une croissance régulière de  $7,8$  à  $24,4 \times 10^{19}$  J/an avec une incertitude relative qui décroît de façon importante de 13% à 4% et un accroissement significatif de la variance qui passe de 76% à 96%.

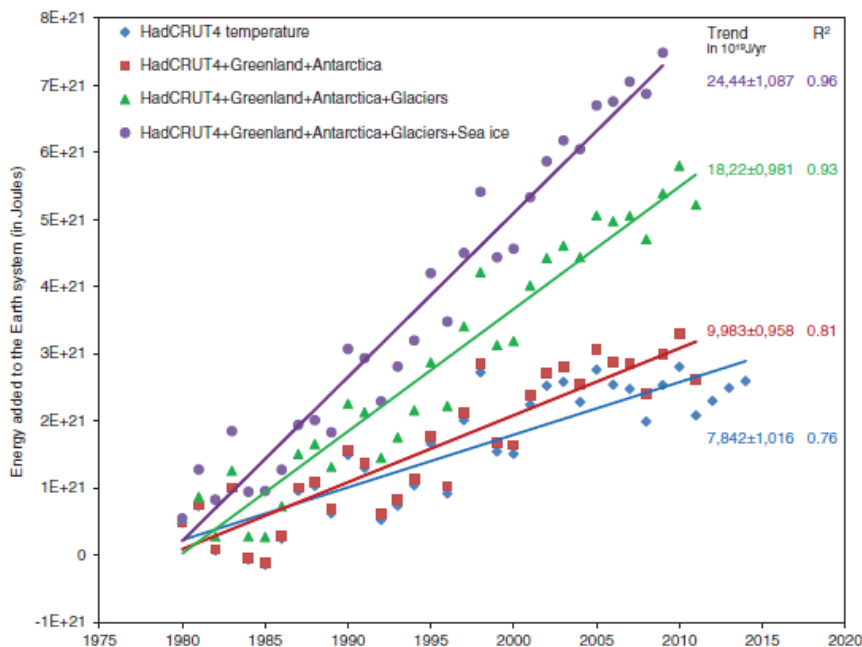


Figure 3 : Énergie ajoutée à l'atmosphère et à la cryosphère depuis 1980. L'énergie pour l'atmosphère est calculée à partir des données de température de HadCRUT4 ; l'énergie absorbée par la cryosphère est calculée à partir de la perte de masse liée à la fonte des glaciers du Groenland, de l'Antarctique, des glaciers de montagne et de la banquise.

## 6. Discussion et conclusions

À partir de l'analyse statistique des données de HadCRUT4, de Cowtan-Way, de Karl et al., et des données moyennées de ces trois ensembles, nous avons montré qu'il y a un ralentissement du rythme d'augmentation de leur GSAT dans la période 2002-2011 par rapport à 1992-2001, ralentissement significatif à mieux que le niveau de signification 0,1. Par exemple, ce ralentissement dans les données moyennées des 3 ensembles s'élève à  $0,316 \pm 0,147$  °C/décennie, ce qui est significatif au niveau 0,06.

D'après nos calculs (Tableau SM2), la chaleur acquise par la Terre depuis le début du 21<sup>e</sup> siècle, (que l'on suppose égale à  $9 \times 10^{21}$  J/an d'après *Stocker et al.* (2013) sur la période 2002-2011 ; Textes S4 et S5) se redistribue comme indiqué ci-dessous (à la différence de la distribution du GIEC caractérisant la période 1971-2010 avec un gain en chaleur de  $6,85 \times 10^{21}$  J/an) :

- Au lieu que 1% de l'énergie totale acquise par la Terre ( $9 \times 10^{19}$  J/an) soit utilisé pour réchauffer l'atmosphère, les observations entre 2002 et 2011 donnent 0,28% pour les  $0,05$ °C/décennie du GIEC, 0,21% pour les  $0,0396$  °C/décennie de Cowtan-Way, 0,1 % pour les  $0,018$  °C/décennie de Karl et al., et seulement 0,04% pour les  $0,0086$  °C/décennie pour l'ensemble constitué des données moyennées.
- Si l'atmosphère avait continué à se réchauffer entre 2002 et 2011 comme elle l'a fait entre 1992 et 2001, elle aurait eu besoin, selon que l'on considère HadCRUT4 ou Cowtan-Way ou Karl et al. ou les données moyennées, de 2,0% ou 1,7% ou 1,64% ou 1,8% de plus de l'énergie totale acquise par la Terre que ce qui a été effectivement utilisé.
- Au lieu de 3% pour la fonte de la glace, ce sont 4,34% ( $39,1 \times 10^{19}$  J/an) qui doivent être disponibles pour faire fondre 1172 Gt de glace/an entre 2002 et 2011. Si la fonte s'était poursuivie telle qu'elle était entre 1992 et 2001 (509 Gt de glace/an) elle n'aurait eu besoin que de 1,9% ( $17 \times 10^{19}$  J/an) de l'énergie totale acquise par la Terre, c'est-à-dire 2,44% ( $22,1 \times 10^{19}$  J/an) de moins que la quantité effectivement nécessaire pour faire fondre la perte de glace observée soit 1172 Gt.
- Si on suppose que la fonte des 652 Gt de glace/an pendant l'intervalle 2002-2011, à peu près la moitié des 1172 Gt annuelles de fonte durant cette période, est liée à l'atmosphère, l'énergie prise à l'atmosphère serait de 2,41% ( $21,7 \times 10^{19}$  J/an), ce qui n'est pas très différent de l'énergie nécessaire pour faire fondre les 663 Gt de glace/an supplémentaires (2,44%) résultant de l'accélération de la fonte de glace.
- L'énergie associée au ralentissement du réchauffement global pendant la période 2002-2011 comparée à 1992-2001 exprimée en pourcentage de l'énergie totale acquise par la Terre est pour HadCRUT4 (2,04%), pour Cowtan-Way (1,7%) pour Karl et al. (1,6%) et pour l'ensemble moyenné des 3, (1,8%). Ceux-ci sont de fait comparables au 1,17% ( $10,5 \times 10^{19}$  J/an) d'énergie nécessaire pour faire fondre 316 Gt de glace/an, une estimation de ce que pourrait faire l'atmosphère.
- Par conséquent, la part de l'énergie gagnée par l'océan et les continents pris dans leur ensemble est à peine modifiée.

Étant donné les incertitudes qui subsistent dans les données utilisées, le problème de la pause-hiatus n'est pas entièrement résolu et plusieurs explications restent possibles. Parmi celles-ci, notre conjecture est que l'accélération de la fonte de glace Arctique peut avoir joué un rôle important dans le démarrage de la pause. Ainsi, le réchauffement exceptionnel observé pour 2014, 2015, et 2016 [*Hansen et Sato*, 2016] semble être concomitant avec un ralentissement de la fonte de la banquise depuis 2013, à l'exception de l'anomalie inédite de la faible étendue de la banquise des mois d'automne 2016 et de l'hiver 2017 [*NSIDC*, 2016].

Dans le rapport du GIEC [Stocker et al., 2013], le scénario RCP8.5 conduit à une disparition de la banquise de septembre dans l'hémisphère nord vers 2060 alors que l'extrapolation de la fonte actuelle de la banquise la fait disparaître dans les 30 prochaines années, comme le montre aussi notre estimation (Tableau 3 et Overland et Wand, 2013). C'est pourquoi, outre les affirmations de Schmidt et al. [2014] pointant un manque dans l'estimation d'influences externes sur le climat dans les simulations des modèles, nous recommandons qu'une attention particulière soit accordée à l'accélération de la fonte de glace entre la période précédant le début du 21<sup>e</sup> siècle et celle après, en particulier en ce qui concerne la banquise Arctique (en volume), le Groenland et les glaciers de haute altitude. Pour améliorer notre compréhension, la contribution du El Niño au réchauffement exceptionnel de 2015-2016 doit être correctement estimée. En effet, d'après le Met Office [2017], l'événement El Niño particulièrement intense a contribué environ 0,2 °C à la moyenne annuelle de 2016, qui se situait à environ 0,77±0,1°C au-dessus de la moyenne de la période 1961-1990. Sans le El Niño, 2016 aurait alors été comme 2014 et dans la marge d'erreur des 15 dernières années. Ainsi, on peut difficilement affirmer que la pause est terminée, elle pourrait avoir été simplement interrompue par un El Niño intense et pourrait reprendre.

Nous suggérons que le "hiatus du réchauffement global" est une redistribution de la chaleur acquise par la Terre, une redistribution qui compte la fonte de glace parmi ses bénéficiaires. Cependant, cela n'empêche pas d'envisager également d'autres causes pour expliquer la décroissance du rythme de réchauffement pendant la première décennie du 21<sup>e</sup> siècle, par exemple, une augmentation de transfert de chaleur de la couche supérieure de l'océan vers l'océan profond même s'il est difficile de mettre en évidence une signature de l'absorption de chaleur de l'océan profond [Dieng et al., 2015b], et/ou un forçage radiatif incorrect ou manquant (une augmentation de l'activité volcanique, une diminution de l'activité solaire), et/ou la variabilité naturelle du système Terre aux échelles de temps décennale à séculaire [Dieng et al., 2017a].

## Remerciements

Les auteurs remercient le Dr François Massonnet de leur avoir fourni la réanalyse LLN des données sur la glace de mer, le Dr Olivier Lecomte d'avoir attiré leur attention sur les mares de fonte de la glace de mer et le Dr. Fu Liu de les avoir aidés pour le manuscrit ; tous sont membres du Earth and Life Institute, Université catholique de Louvain à Louvain-la-neuve, Belgique. Les auteurs tiennent à remercier également les Drs. A.Cazenave, J. Comiso, X. Fettweis et B. Marzeion pour leur apport sur la contribution de l'atmosphère à la fonte de la glace. Ils remercient également Elisabeth Huffer pour sa contribution à l'amélioration de l'anglais du texte original et à la traduction de cet article en français. Ils sont reconnaissants à l'éditeur dont les commentaires ont grandement amélioré le manuscrit. AB est membre de "Sauvons Le Climat". Q. Z. Yin est chercheur associé au Belgian National Fund for Scientific Research (F.R.S.-FNRS). Les données HacCRUT4 sont accessibles à [http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcru4/data/versions/previous\\_versions.html](http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcru4/data/versions/previous_versions.html) celles de Cowtan-Way à [http://www-users.york.ac.uk/~kdc3/papers/coverage2013/had4\\_krig\\_annual\\_v2\\_0\\_0.txt](http://www-users.york.ac.uk/~kdc3/papers/coverage2013/had4_krig_annual_v2_0_0.txt) et celles de Karl et al. à <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/scpub201506/>

## Données supplémentaires

<http://binarystore.wiley.com/store/10.1002/2017EF000554/asset/supinfo/eft2224-sup-0001-2017EF000554-SI.pdf?v=1&s=3523212a977816224e71ddc2698372cdde9b960b>

## Références

Abraham, J. P., et al. (2013), A review of global ocean temperature observations: Implications for ocean heat content

- estimates and climate change, *Rev. Geophys.*, 51(3), 450–483. <https://doi.org/10.1002/rog.20022>.
- Box, J. E., X. Fettweis, J. C. Stroeve, M. Tedesco, D. K. Hall, and K. Steffen (2012), Greenland ice sheet albedo feedback: Thermodynamics and atmospheric drivers, *Cryosphere*, 6, 821–839. <https://doi.org/10.5194/tc-6-821-2012>.
- Box J. E., J. Cappelen, C. Chen, D. Decker, X. Fettweis, T. Mote, M. Tedesco, R. S. W. van de Wal, and J. Wahr (2013). In Arctic Report Card: Update for 2012. [Available at [http://www.arctic.noaa.gov/report12/greenland\\_ice\\_sheet.html](http://www.arctic.noaa.gov/report12/greenland_ice_sheet.html).]
- Cazenave, A., and F. Remy (2011), Sea level and climate: Measurements and causes of changes, *WIREs Clim. Change*, 2, 647–662. <https://doi.org/10.1002/wcc.139>.
- Cazenave, A., K. Dominh, S. Guinehut, E. Berthier, W. Llovel, G. Ramillien, M. Ablain, and G. Larnicol (2009), Sea-level budget over 2003–2008: a reevaluation from GRACE space gravimetry satellite altimetry and Argo, *Global Planet. Change*, 65, 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.10.004>.
- Cazenave, A., H.-B. Dieng, M. Benoit, K. von Schuckmann, B. Decharme, and E. Berthier (2014), The rate of sea-level rise, *Nat. Clim. Change*, 4, 358–361. <https://doi.org/10.1038/nclimate2159>.
- Chen, X., and K. K. Tung (2014), Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration, *Science*, 345, 897–903. <https://doi.org/10.1126/science.1254937>.
- Comiso, J. C., and D. K. Hall (2014), Climate trends in the Arctic as observed from space, *WIREs Clim. Change*, 5, 389–409. <https://doi.org/10.1002/wcc.277>.
- Cowtan, K., and R. G. Way (2014), Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 140, 1935–1944. <https://doi.org/10.1002/qj.2297>.
- Dieng, H. B., A. Cazenave, K. von Schuckmann, M. Ablain, and B. Meyssignac (2015a), Sea level budget over 2005–2013: Missing contribution and data errors, *Ocean Sci. Discuss.*, 11, 1–34. <https://doi.org/10.5194/os-11-1-2015>.
- Dieng, H. B., H. Palanisamy, and A. Cazenave (2015b), The sea level budget since 2003, inference on the deep ocean heat content, *Surv. Geophys.*, 36, 209–229. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9314-6>.
- Dieng, H. B., A. Cazenave, B. Meyssignac, K. von Schuckmann, and H. Palanisamy (2017a), Sea and land surface temperatures, ocean heat content. Earth's energy imbalance and net radiative forcing over the recent years, *Int. J. Climatol.*, 37(1). <https://doi.org/10.1002/joc.4996>.
- Dieng, H. B., A. Cazenave, B. Meyssignac, and M. Ablain (2017b), New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach, *Geophys. Res. Lett.*, 44(8), 3744–3751. <https://doi.org/10.1002/2017GL073308>.
- Doherty, S. J., S. G. Warren, T. C. Grenfell, A. D. Clarke, and R. E. Brandt (2010), Light-absorbing impurities in Arctic snow, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 11,647–11,680. <https://doi.org/10.5194/acp-10-11647-2010>.
- Dumont, M., E. Brun, G. Picard, M. Michou, Q. Libois, J. R. Petit, M. Geyer, S. Morin, and B. Josse (2014), Contribution of light-absorbing impurities in snow to Greenland's darkening since 2009, *Nat. Geosci.*, 7, 509–512. <https://doi.org/10.1038/ngeo2180>.
- Durack, P. J., P. J. Gleckler, F. W. Landerer, and K. E. Taylor (2014), Quantifying underestimates of long-term upper-ocean warming, *Nat. Clim. Change*, 4, 999–1005. <https://doi.org/10.1038/nclimate2389>.
- Easterling, D. R., and M. F. Wehner (2009), Is the climate warming or cooling? *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08706. <https://doi.org/10.1029/2009GL037810>.
- England, M. H., M. G. Shayne, S. Paul, G. A. Meehl, T. Axel, C. Wenju, G. A. Sen, M. J. McPhaden, P. Ariaan, and S. Agus (2014), Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus, *Nat. Clim. Change*, 4, 222–227. <https://doi.org/10.1038/nclimate2106>.
- Estrada, F., P. Perron, and B. Martinez-Lopez (2013), Statistically derived contributions of diverse human influences to twentieth-century temperature changes, *Nat. Geosci.*, 6, 1050–1055. <https://doi.org/10.1038/ngeo1999>.
- Fetterer, F., K. Knowles, W. Meier, and M. Savoie (2014), Sea Ice Index, Natl Snow and Ice Data Center, Boulder, Colo..
- Forsberg, R., L. Sorensen, and S. Simonsen (2017), Greenland and Antarctica ice sheet mass changes and effects on global sea level, *Surv. Geophys.*, 38, 89–104. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9398-7>.
- Foster, G., and S. Rahmstorf (2011), Global temperature evolution 1979–2010, *Environ. Res. Lett.*, 6, 044022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/044022>.
- Hansen J., and M. Sato (2016), A Better Graph. [Available at [http://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2016/20160926\\_BetterGraph.pdf](http://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2016/20160926_BetterGraph.pdf)]
- Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo (2010), Global surface temperature change, *Rev. Geophys.*, 48, RG4004. <https://doi.org/10.1029/2010RG000345>.
- Hansen J., M. Sato, R. Ruedy, G. A. Schmidt, K. Lo, A. Persin (2017), Global Temperature 2016. [Available at <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>].
- Held, I. M. (2013), The cause of the pause, *Nature*, 501, 318–319. <https://doi.org/10.1038/501318a>.
- Holland, M. M., C. M. Bitz, and B. Treblay (2006), Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice, *Geophys. Res. Lett.*, 33, 1–5, L23503. <https://doi.org/10.1029/2006GL028024>.
- Holland, P. R., C. Enright, M. Losch, N. T. Kurtz, and R. Kwok (2014), Modeled trends in Antarctica sea ice thickness, *J. Clim.*, 27, 3784–3801. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00301.1>.

- Karl, T. R., A. Anthony, H. Boyin, J. H. Lawrimore, J. R. McMahon, M. J. Menne, T. C. Peterson, R. S. Vose, and Z. Huai-Min (2015), Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus, *Science*, 348, 1469–1472. <https://doi.org/10.1126/science.aaa5632>.
- Kaufmann, R. K., K. Heikki, M. L. Mann, and J. H. Stock (2011), Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 108(29), 11,790–11,793. <https://doi.org/10.1073/pnas.1102467108>.
- Keegan, K. M., M. R. Albert, J. McConnell, and I. Baker (2014), Climate change and forest fires synergistically drive widespread melt events of the Greenland Ice Sheet, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 111(22), 7964–7967. <https://doi.org/10.1073/pnas.1405397111>.
- Keenlyside, N. S., M. Latif, J. Jungclaus, L. Kornblueh, and E. Roeckner (2008), Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector, *Nature*, 453, 84–88. <https://doi.org/10.1038/nature06921>.
- Kosaka, Y., and S. P. Xie (2013), Recent global warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling, *Nature*, 501, 403–407. <https://doi.org/10.1038/nature12534>.
- Lecomte, O., T. Fichfet, M. Vancoppenaolle, F. Domine, F. Massonnet, P. Mathiot, S. Morin, and P. Y. Barriat (2013), On the formulation of snow thermal conductivity in large-scale sea ice models, *J. Adv. Model Earth Syst.*, 5, 1–16. <https://doi.org/10.1002/jame.20039>.
- Lecomte, O., T. Fichfet, D. Flocco, D. Schroeder, and M. Vancoppenolle (2014), Interactions between wind-blown snow redistribution and melt ponds in a coupled ocean–sea ice model, *Ocean Model.*, 87, 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.12.003>.
- Levitus, S., et al. (2012), World ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010, *Geophys. Res. Lett.*, 39(10), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2012GL051106>.
- Llovel, W., J. K. Willis, F. W. Landerer, and I. Fukumori (2014), Deep-ocean contribution to sea level and energy budget not detectable over the past decade, *Nat. Clim. Change*, 4(11), 1031–1035. <https://doi.org/10.1038/nclimate2387>.
- Mahlstein, I., and R. Knutti (2012), September Arctic sea ice predicted to disappear near 2 °C global warming above present, *J. Geophys. Res.*, 117, D06104. <https://doi.org/10.1029/2011JD016709>.
- Marzeion, B., A. H. Jarosch, and M. Hofer (2012), Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers, *Cryosphere*, 6, 1295–1322. <https://doi.org/10.5194/tc-6-1295-2012>.
- Marzeion, B., N. Champollion, W. Haeberli, K. Langley, P. Leclercq, and F. Paul (2017), Observations-based estimates of global glacier mass change and its contribution to sea-level change, *Surv. Geophys.*, 38, 105–130. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9394-y>.
- Massonnet, F., T. Fichfet, H. Goosse, C. Bitz, G. Philippon-Berthier, and P. Barriat (2012), Constraining projections of summer Arctic sea ice, *Cryosphere*, 6, 1383–1394. <https://doi.org/10.5194/tc-6-1383-2012>.
- Massonnet, F., P. Mathiot, T. Fichfet, H. Goosse, C. K. Beatty, M. Vancoppenolle, and T. Lavergne (2013), A model reconstruction of the Antarctic sea ice thickness and volume over 1980–2008 using data assimilation, *Ocean Model.*, 64, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.01.003>.
- Medaugh, I., M. B. Stolpe, E. M. Fisher, and R. Knutti (2017), Reconciling controversies about the ‘global warming hiatus’, *Nature*, 545, 41–47. <https://doi.org/10.1038/nature22315>.
- Meehl, G. A., J. M. Arblaster, J. T. Fasullo, A. Hu, and K. E. Trenberth (2011), Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods, *Nat. Clim. Change*, 1, 360–364. <https://doi.org/10.1038/nclimate1229>.
- Met Office. (2017), 2016: One of the two warmest years. [Available at <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/data/current/download.html>].
- Morice, C. P., J. J. Kennedy, N. A. Rayner, and P. D. Jones (2012), Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set, *J. Geophys. Res.*, 117, D08101. <https://doi.org/10.1029/2011JD017187>.
- Neely, R. R., III, et al. (2013), Recent anthropogenic increases in SO<sub>2</sub> from Asia have minimal impact on stratospheric aerosol, *Geophys. Res. Lett.*, 40(5), 999–1004. <https://doi.org/10.1002/grl.50263>.
- NSIDC. (2016a), Monthly Sea-Ice Extent. [Available at <ftp://sidads.colorado.edu/DATASETS/NOAA/G02135/>].
- NSIDC. (2016b), Sea Ice Hits Record Lows. [Available at <https://nsidc.org/arcticseaicenews/2016/12/arctic-and-antarctic-at-record-low-levels/>].
- Overland, J. E., and M. Wang (2013), When will the summer Arctic be nearly sea ice free? *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2097–2101. <https://doi.org/10.1002/GRL.50316>.
- Perovich, D., J. Richter-Menge, C. Polashenski, B. Elder, T. Arbetter, and O. Brennick (2014), Sea ice mass balance observations from the North Pole Environmental Observatory, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2019–2025. <https://doi.org/10.1002/2014GL059356>.
- PIOMAS. (2016), [Available at [http://psc.apl.washington.edu/wordpress/wp-content/uploads/schweiger/ice\\_volume/PIOMAS.2sst.monthly.Current.v2.1.txt](http://psc.apl.washington.edu/wordpress/wp-content/uploads/schweiger/ice_volume/PIOMAS.2sst.monthly.Current.v2.1.txt)].
- Polashenski, C., D. Perovich, and Z. Courville (2012), The mechanisms of sea ice melt pond formation and evolution, *J. Geophys. Res.*, 117, 1–23. <https://doi.org/10.1029/2011JC007231>.

- Purkey, S. G., C. G. Johnson, and Q. P. Chambers (2014), Relative contributions of ocean mass and deep steric changes to sea level rise between 1993 and 2013, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 7509–7522. <https://doi.org/10.1002/2014JC010180>.
- Ridley, D. A., et al. (2014), Total volcanic stratospheric aerosol optical depths and implications for global climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7763–7769. <https://doi.org/10.1002/2014GL061541>.
- Rignot, E., I. Velicogna, M. R. van den Broeke, A. Monaghan, and J. T. M. Lenaerts (2011), Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice, *Geophys. Res. Lett.*, 38, 1–5, L05503. <https://doi.org/10.1029/2011GL047109>.
- Santer, B. D., et al. (2014), Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature, *Nat. Geosci.*, 7, 185–189. <https://doi.org/10.1038/NGEO2098>.
- Schmidt, G. A., D. T. Shindell, and K. Tsigaridis (2014), Reconciling warming trends, *Nat. Geosci.*, 7, 158–160. <https://doi.org/10.1038/ngeo2105>.
- Schröder, D., D. L. Feltham, D. Flocco, and M. Tsamados (2014), September Arctic sea-ice minimum predicted by spring melt-pond fraction, *Nat. Clim. Change*, 4, 353–357. <https://doi.org/10.1038/nclimate2203>.
- Schweiger, A. J. (2017), Unified Sea Ice Thickness Climate Data Record, Polar Science Center, Applied Physics Laboratory, Univ. of Washington [Available at [http://psc.apl.uw.edu/sea\\_ice\\_cdr/](http://psc.apl.uw.edu/sea_ice_cdr/)]
- Shepherd, A., et al. (2012), A reconciled estimate of ice-sheet mass balance, *Science*, 38, 1183–1189. <https://doi.org/10.1126/science.1228102>.
- Solomon, S. (2010), Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming, *Science*, 327, 11219–11223. <https://doi.org/10.1126/science.1182488>.
- Stauning, P. (2014), Reduced solar activity disguises global temperature rise, *Atmos. Clim. Sci.*, 4, 60–63.
- Stocker, T. F., Q. Dahe, G.-K. Plattner, M. M. B. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, X. Yu, V. Bex, and P. M. Midgley (2013), *Climate Change 2013, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., 1533 pp.
- Tans, P. and R. Keeling (2014), NOAA/ESRL [Available at [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)], Scripps Institution of Oceanography [Available at [scrippsco2.ucsd.edu/](http://scrippsco2.ucsd.edu/)].
- Trenberth, K. E., and J. T. Fasullo (2013), An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, 1, 19–32. <https://doi.org/10.1002/2013EF000165>.
- von Schuckmann, K., J.-B. Sallée, D. Chambers, P.-Y. Le Traon, C. Cabanes, F. Gaillard, S. Speich, and M. Hamon (2014), Consistency of the current global ocean observing systems from an Argo perspective, *Ocean Sci.*, 10, 547–557. <https://doi.org/10.5194/os-10-547-2014>.
- WMO. (2015), *WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2014*. WMO No. 1152, World Meteorol. Org., Geneva, Switzerland.
- Yan, X.-H., T. Boyer, K. Trenberth, T. R. Karl, S.-P. Xie, V. Nieves, K.-K. Tung, and D. Roemmich (2016), The global warming hiatus: Slowdown or redistribution? *Earth's Future*, 4, 472–482. <https://doi.org/10.1002/2016EF000417>.
- Zemp, M., et al. (2015), Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century, *J. Glaciol.*, 61(228), 745–762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>.
- Zunz, V., H. Goosse, and F. Massonnet (2013), How does the internal variability influence the ability of CMIP5 models to reproduce the recent trend in Southern Ocean sea ice extent? *Cryosphere*, 7, 451–468. <https://doi.org/10.5194/tc-7-451-2013>.
- Zygmuntowska, M., P. Rampal, N. Ivanova, and L. H. Smedsrud (2014), Uncertainties in Arctic sea ice thickness and volume: New estimates and amplification for trends, *Cryosphere*, 8, 705–720. <https://doi.org/10.5194/tc-8-705-2014>.