

## Diminution des nuages bas et effets des aérosols : vers une amplification du réchauffement

L'évaluation de l'amplitude du réchauffement climatique dépend avant tout de son effet sur les nuages bas, qui refroidissent la basse atmosphère. Or le brassage vertical de la vapeur d'eau, qui augmente avec la température, favorise leur formation à des altitudes nettement supérieures, ce qui accroît leur effet de serre, qui lui amplifie l'accroissement de chaleur. Une même évolution plutôt pessimiste des scientifiques est observée pour l'impact des particules d'aérosols, dont l'effet estimé refroidissant devra être révisé. Au total, la science récente nous suggère de renforcer nos politiques d'atténuation.

### Les nuages bas déterminants pour l'ampleur du réchauffement

#### Le réchauffement climatique

Le réchauffement climatique est provoqué initialement par les émissions de gaz à effet de serre (GES) à longue durée de vie, principalement le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), [le méthane](#) (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), qui piègent la chaleur terrestre en l'empêchant de s'échapper vers l'espace.

Réchauffement observé (1850-1900) à (1986-2005) [A]	Scénario d'émissions de gaz à effet de serre (GES)		Réchauffement projeté (1986-2005) à (2081-2100) [B1]		Total réchauffement projeté (1850-1900) à (2081-2100)	
	Type	Nom	Meilleure estimation	Plage probable	Meilleure estimation	Plage probable
0,6	Accord climat : réduction des émissions	RCP 2,6	1	0,3 à 1,7	1,6	0,9 à 2,3
	Stabilisation des concentrations des GES	RCP 4,5	1,8	1,1 à 2,6	<b>2,4</b>	1,7 à 3,2
	Fortes émissions	RCP 8,5	3,7	2,6 à 4,8	4,3	3,2 à <b>5,4</b>

#### Réchauffement projeté entre 1850-1900 ou 1986-2005 et 2081-2100 (en °C)

Sources :

[A] GIEC, 5<sup>e</sup> rapport GT2, 2014, figure RID.4

[B1] GIEC, 5<sup>e</sup> rapport GT1, 2013, tableau RID 2

Le 5<sup>e</sup> rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) projetait que, sans atténuation du changement climatique par des mesures climatiques réduisant les émissions de GES, leur piégeage de la chaleur et les mécanismes amplifiant leur réchauffement initial provoqueront une augmentation de température de 1,7 à 5,4° en 2081-2100 par rapport à 1850-1900 (voir tableau ci-dessus). Pour chaque

scénario envisagé, de stabilisation ou de fortes émissions, une meilleure estimation de l'augmentation de température en 2081–2100 est donnée, avec sa fourchette inférieure et supérieure.

### **Les mécanismes amplificateurs du réchauffement**

Les mécanismes amplificateurs du réchauffement initial provoqué par les émissions de GES, appelés rétroactions positives, sont les suivants :

- le pouvoir réfléchissant (l'albédo) de la surface de la Terre : la fonte de la neige et de la glace sur la surface de la Terre, provoquée par le réchauffement climatique, fait baisser la réflectivité du sol et ainsi augmente la part du rayonnement solaire absorbée par la surface de la Terre, qui réchauffe davantage son environnement.

- la vapeur d'eau, qui est un gaz à effet de serre : en condition normale, sans réchauffement, elle est régulée et n'a pas d'impact direct sur l'augmentation de l'effet de serre. En effet, quand sa concentration augmente, elle finit par atteindre son point de saturation et se transforme alors en pluie par condensation, ce qui réduit brutalement sa teneur dans l'atmosphère. Par contre, l'augmentation de la température accroît de manière pérenne le contenu atmosphérique en vapeur d'eau, ce qui alors augmente l'effet de serre absorbant la chaleur (appelée rayonnement infrarouge) terrestre et donc la température de surface [I].

- les nuages hauts (soit 40% d'entre eux), cirrus et enclumes, constitués de cristaux de glace, relativement transparents au rayonnement solaire et à effet de serre, également réchauffant [II].

### **Les nuages bas refroidissent l'atmosphère**

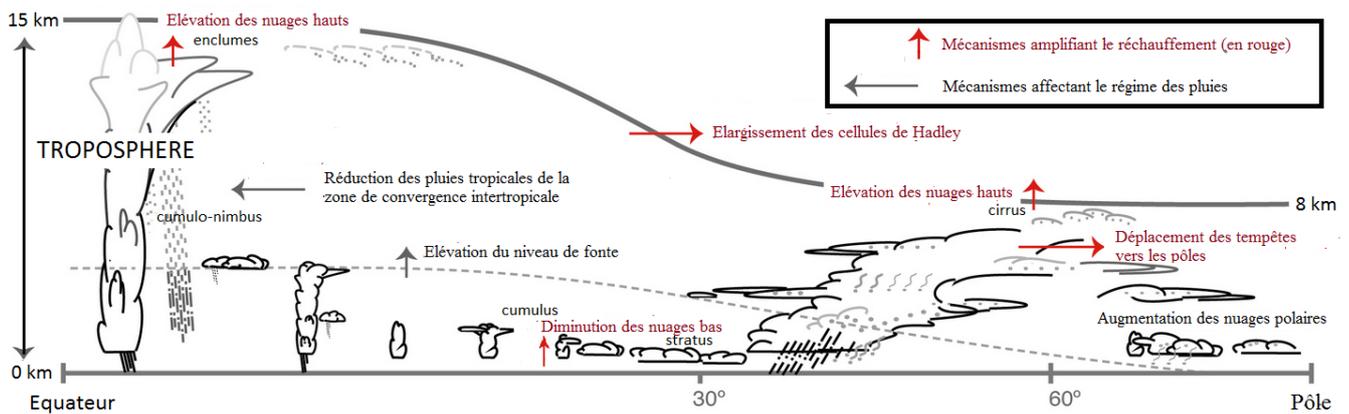
L'ensemble des nuages couvre en permanence 70% de notre planète et se situent dans la troposphère, la partie de l'atmosphère comprise entre 0 et 8 à 15 km (voir dessin ci-dessous), qui se réchauffe (+1,1° en 2016 depuis 1850 d'après l'Organisation météorologique mondiale (OMM) [III]).

Les nuages bas (40% des nuages également), jusqu'à 2-3 km d'altitude, stratus et cumulus, constitués de gouttelettes d'eau, ont tendance à refroidir l'atmosphère sous-jacente (la basse troposphère) en réfléchissant le rayonnement solaire vers l'espace (effet parasol). C'est leur réponse au réchauffement, selon que leur quantité va se réduire ou rester stable, qui cause la variation importante observée entre les différents modèles climatiques. La connaissance des mécanismes qui les contraignent progresse mais n'est pas encore assez développée. « *Nous commençons à avoir des séries de 20-30 ans d'observations par satellites de la circulation atmosphérique, mais cela n'est pas assez* », estime Olivier Boucher, directeur de recherche au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD/IPSL (Institut Pierre Simon Laplace)) à Jussieu.

« *La grande incertitude de l'amplitude du réchauffement climatique vient des nuages bas* », explique Sandrine Bony, directrice de recherche CNRS au LMD.

### **Les nuages bas diminuent**

Dans le dernier rapport du GIEC, les modèles climatiques à grande échelle estimaient possible une diminution de cette couverture nuageuse basse [B2] amplifiant le réchauffement. Cependant cette hypothèse n'avait qu'un faible degré de confiance.



Coupe latitudinale des réponses des nuages au réchauffement

Source : GIEC, 5<sup>e</sup> rapport, 2013, figure 7-11 [B3]

« La rétroaction des nuages bas est influencée par l'intensité du mélange vertical de vapeur d'eau. Or, pour chaque degré de réchauffement, la vapeur d'eau dans l'atmosphère augmente de 7% », note Sandrine Bony. Ce brassage, entre la surface et les plus hautes couches de la troposphère (9-15 km), intensifie le transport vertical de l'air, appelé alors convection profonde. L'air très humide monte tandis que l'air sec descend, ce qui réduit la formation des nuages bas. A l'inverse, l'évaporation, qui augmente aussi avec le réchauffement climatique de 2% par degré au-dessus des océans, favorise leur formation. Une étude, menée par S. Sherwood, publiée dans Nature en 2014, portant sur 43 des modèles climatiques de circulation générale (General circulation model, GCM), dont la résolution est de 50 à 200 km, établit que le phénomène de brassage de la vapeur d'eau est plus puissant que l'évaporation, ce qui entraîne une **diminution des nuages bas et donc une amplification du réchauffement** [1].

Un article publié en 2017 indique que certains modèles possédant une échelle très fine, avec une résolution pouvant atteindre 100 mètres, estiment eux aussi possible une diminution de la couverture nuageuse dans les basses couches de l'atmosphère mais moindre à faible altitude que ce que montrent les modèles à plus grande échelle [2]. « Ces modèles GCM décrivent une disparition de la base des nuages », indique Sandrine Bony. Ces nouveaux calculs plus fins permettent d'observer qu'elle semble moins affectée et que les nuages changent surtout vers 2-3 km d'altitude, où a lieu une inversion des températures». La campagne EUREC4A [3] de mesures qui aura lieu en 2020 précisera ces différences.

### Vers un réchauffement climatique en 2081–2100 de 2,4 à 5,4°

L'équipe de Sherwood montre que ce mécanisme de brassage expliquerait environ 50% de la variabilité des modèles GCM étudiés et qu'il a été intégré de manière irréaliste, bien trop faiblement, dans ceux dont la sensibilité climatique est faible, c'est à dire calculant une augmentation de température de 1,5 à 3° pour un doublement de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>. Le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC de 2013 annonçait une sensibilité climatique [I] de 1,5 à 4,5°, avec sa meilleure estimation à 3°. Avec l'intégration de la rétroaction positive du brassage vertical de la vapeur d'eau sur la formation des nuages bas, sa meilleure estimation serait de 4°, avec une fourchette inférieure à 3° [1].

Si une telle évaluation se confirmait, alors, également, **seules les fourchettes supérieures des estimations du réchauffement du GIEC à la fin du siècle seraient à conserver** [[1], page 41, colonne de gauche, lignes 4 à 6]. La plage probable d'accroissement de température passerait alors de **2,4°** (meilleure estimation du scénario RCP 4.5 de stabilisation des émissions) à **5,4°** en 2081–2100, par rapport à 1850-1900, et non 1,7° (sa fourchette inférieure) à 5,4° (voir colonnes et lignes 4 et 5 du tableau ci-dessus).

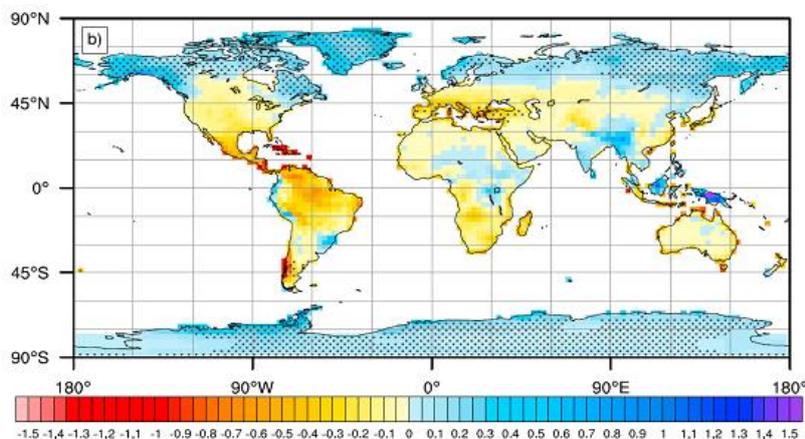
## L'agrégation des nuages ne compensera pas le réchauffement

Des études ont mis en avant dès 2005 qu'une modification attendue au niveau de l'agrégation des nuages pourrait avoir des rétroactions conséquentes. Les publications plus récentes en améliorent la connaissance. L'une d'elles, parue dans PNAS en 2016 [4], indique ainsi qu'avec l'augmentation de la température, les cumulo-nimbus ont tendance à se former en amas, là où se trouvent d'autres nuages. Dans les hautes couches de l'atmosphère, à 12 km d'altitude, cela entraîne une réduction des enclumes, des nuages hauts à effet de serre. Cela réduit au final cette couverture nuageuse et devrait mieux laisser s'échapper la chaleur (le rayonnement infra-rouge) vers l'espace, ce qui diminuerait la température. « C'est ce que l'on appelle l'effet d'iris [[IV], Figure 1.22 p 37], précise Sandrine Bony. Une hypothèse qui date des années 90 indiquait qu'ainsi la Terre régulerait l'augmentation de la température. En réalité, les études montrent que cela n'a qu'un faible impact et que les modèles ne manquaient déjà pas ce phénomène » [IV].

### FOCUS :

Le régime des pluies tropicales pourra être affecté par plusieurs mécanismes :

- La surface plus faible de nuages provoquée par leur agrégation pourra réduire la zone de convergence intertropicale des pluies (voir coupe latitudinale ci-dessus), qui se situe à quelques centaines de kilomètres de part et d'autre de l'équateur [3]. « Dans les années 70, la sécheresse au Sahel était liée au déplacement de cette zone », rappelle Sandrine Bony.
- La mousson de l'Afrique de l'Ouest pourra être intensifiée par l'effet (radiatif, c'est à dire agissant par le biais du rayonnement (infrarouge)) d'absorption de la chaleur du CO<sub>2</sub> augmentant alors les précipitations du centre et de l'est du Sahel (voir carte ci-dessous) [5]



P-E<0 : Sécheresses augmentées

P-E>0 : Sécheresses diminuées

Variation mondiale des sécheresses (précipitations (P) moins évapotranspiration (E) < 0) en 2080-2100 par rapport à 1980-2000 suivant le scénario RCP 8.5

Sources : Greve P. and S.Seneviratne, 2015 [6]

- L'augmentation de la température de l'océan Atlantique tropical pourra augmenter la sécheresse de l'ouest du Sahel (voir carte ci-dessus et son commentaire dans l'article « [Des canicules plus fréquentes et des régions sèches plus étendues dans un monde plus chaud](#) » ) [7].

# L'effet absorbant réchauffant des aérosols devient plus important que celui refroidissant par réflexion

## Les particules refroidissantes

Le réchauffement climatique est causé principalement par les gaz à effet de serre à longue durée de vie (de quelques dizaines à centaines d'années), formés de très petites molécules (environ  $10^{-10}$  m), laissant pénétrer l'intégralité du rayonnement solaire et se répartissant de manière homogène sur l'ensemble de la troposphère (entre 0 et 8 à 15 km (voir coupe latitudinale ci-dessus)). Il a été partiellement masqué depuis 1750 par les particules (appelées également aérosols, taille de l'ordre du micron ( $10^{-6}$  m)) en suspension dans l'atmosphère, qui n'y résident que quelques semaines [V] avec une répartition très peu homogène, comme les nitrates et sulfates issus du dioxyde de soufre  $SO_2$ . Ces derniers, les principales de ces particules, proviennent de la combustion complète mais non dépolluée, du charbon et du pétrole.

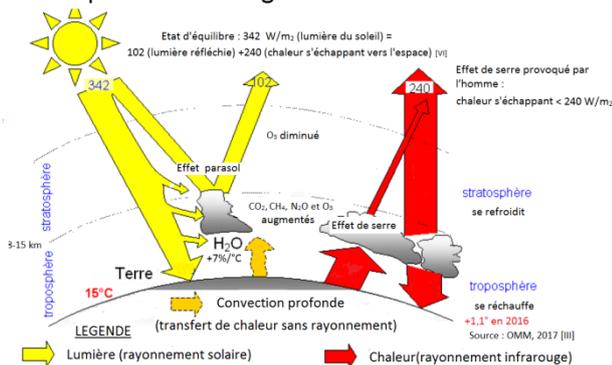
Ces aérosols ont eu, jusqu'ici, tendance à refroidir la troposphère, en réfléchissant le rayonnement solaire vers l'espace (effet parasol), soit directement, soit par un effet indirect, en diminuant la taille et en augmentant le nombre de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace (suivant l'altitude) des nuages, accroissant ainsi leur réflectivité.

« L'hypothèse est que les aérosols (c'est à dire les particules) augmenteraient la quantité de gouttelettes, plus petites, ce qui signifie un même volume réparti sur plus de gouttes, explique Olivier Boucher. Il y aurait alors une surface plus grande qui réfléchirait les rayons du soleil ». Une étude parue en 2017 a mesuré l'effet du  $SO_2$  sur un événement précis et local : l'éruption volcanique de Holuhraun en Islande entre 2014 et 2015. L'équipe de chercheurs a calculé que la réduction observée des gouttelettes a entraîné une réduction du forçage radiatif (la chaleur absorbée par la terre) de  $2 \text{ W/m}^2$  entre septembre et octobre 2014 [8]. « Là, on a vu un impact. Le phénomène était suffisamment important pour qu'il ne soit pas considéré comme du bruit. C'est la première fois qu'on voit cela. Ceci étant, cela reste limité géographiquement », note Olivier Boucher.

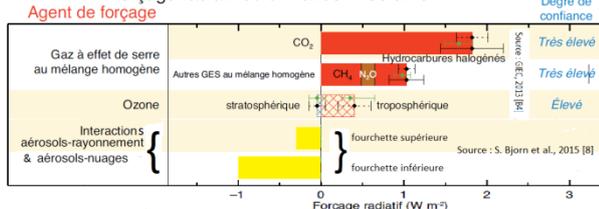
## Les particules absorbantes réchauffantes et la mesure du pouvoir de réchauffement ou de refroidissement

Elles peuvent cependant également avoir un effet d'absorption de chaleur, donc réchauffant, comme la suie (ou carbone-suie), le plus important, provenant de la combustion incomplète du charbon et du pétrole.

### Effet parasol des nuages et effet de serre des GES



### Forçage radiatif du climat de 1750 à 2011



Action réchauffante des gaz à effet de serre à longue durée de vie ( $CO_2, CH_4$  et  $N_2O$ ), de l'ozone ( $O_3$ ) et refroidissante des particules (effet réfléchissant direct et indirect) de 1750 à 2011

Sources :  
 [VI] Bilan énergétique de la Terre et rôle de l'effet de serre, Jean-Louis Dufresne UPMC  
 [III] OMM, 2017  
 [B4] GIEC, 2013

Pour comparer les effets des gaz à effet de serre à longue durée de vie et ces particules, aux échelles d'action spatio-temporelle si différents, les physiciens ont recours à la notion d'équilibre énergétique de la planète à l'instant t. La terre maintient sa température constante si elle reçoit autant d'énergie (appelée forçage radiatif positif, exprimé en  $W/m^2$ ) provenant à l'origine, au sommet de l'atmosphère, du rayonnement solaire, qu'elle n'en laisse s'échapper vers l'espace (forçage radiatif négatif, exprimé dans la même unité mais avec un signe négatif), sous forme de chaleur principalement (voir illustration ci-dessus, figure supérieure). Cette notion de forçage permet d'évaluer une équivalence sur l'effet de serre entre des gaz et des phénomènes physiques et chimiques dont l'action est différente.

### 1750-2011 : l'effet refroidissant des particules revu à la baisse

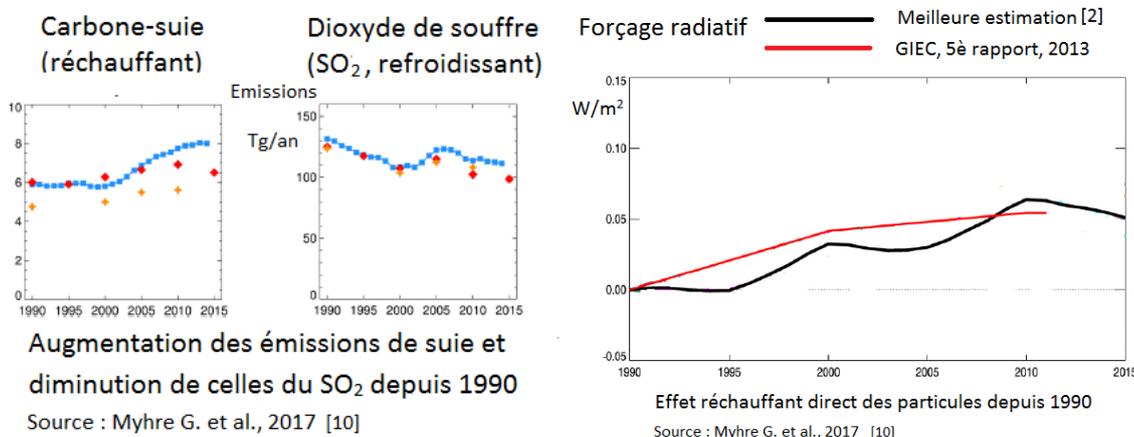
Le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC avait calculé un forçage radiatif total (effet direct sur le rayonnement solaire additionné de celui indirect sur la réflectivité des nuages) des aérosols, entre 1750 et 2011, de  $-1.9 W/m^2$  à  $-0.1 W/m^2$  [B5]. Si la fourchette des valeurs est aussi large, c'est en particulier parce que le GIEC avait par exemple considéré leur forçage radiatif comme étant équivalent entre 1750 et 1850 et 1850 et 1940, alors que les émissions de dioxyde de soufre ont été multipliées par 11 entre ces deux périodes [[9], p 4810].

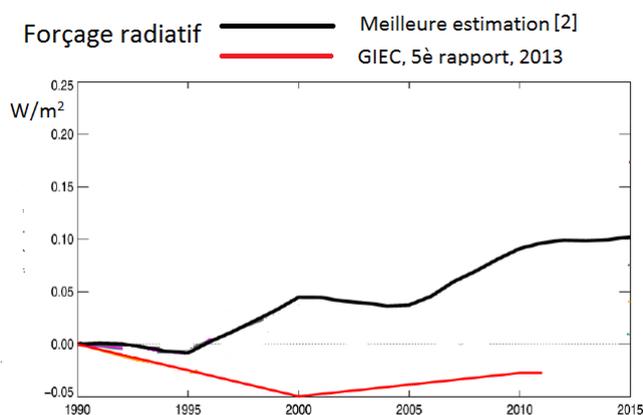
Une étude plus précise de Bjorn Stevens [9] a noté que, pour ce qui concerne les  $0.3^\circ C$  d'augmentation de température globale entre 1750 et 1950, si le forçage radiatif des particules avait été plus négatif (c'est à dire plus refroidissant) que  $-1 W/m^2$  entre 1750-2011, alors aucune émission de gaz à effet de serre provenant de l'hémisphère nord n'aurait contribué à ce réchauffement précoce, ce qui est impossible. « **Ce forçage radiatif est estimé maintenant entre  $-1 W$  et  $-0,5/m^2$** , poursuit Olivier Boucher. *Il faut le comparer au forçage des gaz à effet de serre qui était de  $3 W/m^2$  en 2011 par rapport à 1750* » (voir illustration ci-dessus, figure inférieure).

« *L'effet du CO2 est tellement important que celui des aérosols demeure moindre* », conclut Sandrine Bony.

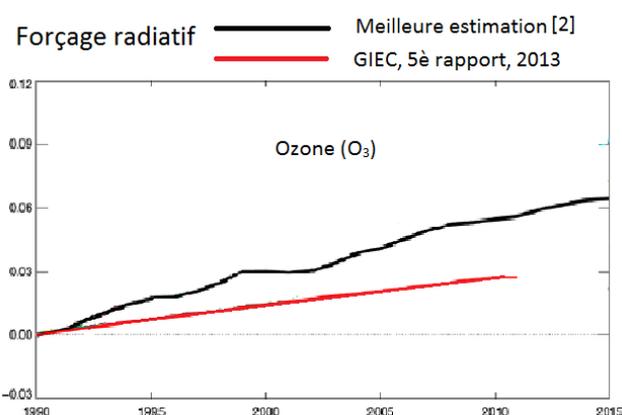
### Action réchauffante des particules et de l'ozone depuis 1990

De plus, depuis 1990, les émissions de dioxyde de soufre (qui forment des sulfates refroidissant le climat) diminuent [[9], figure 1 p 4796] alors que celles réchauffantes de carbone-suie augmentent (voir figures en haut à gauche ci-dessous) [10]. Le résultat est que **les particules contribuent plus au réchauffement depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle** (voir figure en bas à gauche ci-dessous) [10] qu'estimé dans le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC [B5]. Ce résultat concerne la perturbation directe du climat par les particules en suspension dans l'air (voir figure en haut à droite ci-dessous) mais est vrai également si l'on prend en compte l'effet indirect qu'elles ont sur le climat en modifiant les propriétés et la distribution des nuages [10]. Cet effet indirect impliquant le rôle des nuages est un sujet actif de recherche et reste soumis à de grandes incertitudes.





Effet réchauffant global (direct et indirect) des particules depuis 1990  
Source : Myhre G. et al., 2017 [10]



Effet réchauffant de l'ozone depuis 1990  
Source : Myhre G. et al., 2017 [10]

Enfin, le pouvoir réchauffant de l'ozone, sur la même période, progresse lui aussi plus rapidement que celui estimé par le GIEC en 2013 (voir figure en bas à droite ci-dessus) [10].

Ces résultats sont principalement liés au fait que d'autres scénarios d'émissions de polluants plus adaptés à l'étude de la qualité de l'air (voir article [Ozone et particules : agir pour le climat et la santé](#)) ont été utilisés en plus de ceux RCP du GIEC.

## Se mobiliser en 2018 pour éviter un réchauffement planétaire au-delà de 2°

Si ni les nuages bas, ni l'agrégation nuageuse et ni les particules ne pourront compenser même partiellement le réchauffement causé par les activités humaines, alors il ne reste qu'une solution : se mettre sur la trajectoire d'un scénario de réduction élevée des émissions de gaz à effet de serre [VII], permettant de ne pas dépasser 2,3°, voire d'atteindre sa meilleure estimation actuelle : 1,6° (voir tableau « Réchauffement projeté » ci-dessus, ligne RCP 2.6) en 2081–2100 par rapport à 1850-1900.

Cette atténuation renforcée devra s'effectuer simultanément à l'adaptation et dans le contexte d'une [justice climatique](#) et d'une limitation des inégalités.

A cette fin, alors qu'un cri d'alarme inédit de quinze mille scientifiques sur l'état de la planète vient d'être publié [VIII], un temps fort pour se mobiliser pour une mise en œuvre ambitieuse de l'Accord de Paris sera la première étape du sixième cycle d'évaluation du GIEC, consistant en la publication de son rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels, qui sera validé lors de sa session du 1<sup>er</sup> au 7 octobre 2018 [IX].

### Références (revues scientifiques à comité de lecture) :

[1] Sherwood S.C., Bony, S. and Dufresne J.-L. Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. January 2014 | VOL 505 | NATURE 37 ; doi:10.1038/nature12829  
<https://www.nature.com/articles/nature12829>

[2] Vial J., Bony S., Stevens B., and Vogel R. Mechanisms and Model Diversity of Trade-Wind Shallow Cumulus Cloud Feedbacks : A Review. Surv Geophys, 2017. DOI 10.1007/s10712-017-9418-2

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-017-9418-2>

[3] Bony S et al. EUREC4A: A Field Campaign to Elucidate the Couplings Between Clouds, Convection and Circulation 27 September 2017, Surveys in Geophysics pp 1–40  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-017-9428-0>

[4] Bony S. et al., Thermodynamic control of anvil cloud amount. 2016. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, PNAS, August 9, 2016 vol. 113 no. 32 8927-8932  
<http://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1601472113/-/DCSupplemental>

[5] Bony S. et al., Robust direct effect of carbon dioxide on tropical circulation and regional precipitation Nature Geoscience 6, 447–451 (2013)  
<https://www.nature.com/articles/ngeo1799>

[6] Greve, P., and S. I. Seneviratne (2015), Assessment of future changes in water availability and aridity, Geophys. Res. Lett., 42, 5493–5499, doi:10.1002/2015GL064127  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015GL064127/full>

[7] Gaetani M. et al. West African monsoon dynamics and precipitation: the competition between global SST warming and CO2 increase in CMIP5 idealized simulations Clim Dyn (2017) 48:1353–1373, DOI 10.1007/s00382-016-3146-z  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-016-3146-z>

[8] Malavelle F.F. et al. Strong constraints on aerosol–cloud interactions from volcanic eruptions, 22 June 2017 | VOL 546 | NATURE | 485 ; doi:10.1038/nature22974  
<https://www.nature.com/articles/nature22974>

[9] Stevens Bjorn, Rethinking the lower bound on aerosol radiative forcing, Journal of Climate Vol 28, 2015 American Meteorological Society DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00656.  
<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-14-00656.1>

[10] Myhre G. et al., Multi-model simulations of aerosol and ozone radiative forcing due to anthropogenic emission changes during the period 1990–2015 Atmos. Chem. Phys., 17, 2709–2720, 2017  
<https://www.atmos-chem-phys.net/17/2709/2017/>

#### Sources GIEC :

[A] « Changements climatiques : Impacts, adaptation et vulnérabilité, Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), 5è rapport, Groupe de travail 2 (GT2), 2014, figure RID.4 – Détails techniques page 11,  
[https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5\\_wgII\\_spm\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_fr.pdf)

[B] « Changements climatiques :Les éléments scientifiques »: GIEC, 5è rapport, GT1, 2013,  
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

[B1] GIEC, 5è rapport, GT1, 2013, Résumé à l'intention des décideurs, tableau RID 2, page 23  
[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_FRENCH.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf)

[B2] GIEC, 5è rapport, GT1, 2013, Résumé technique, axe thématique (AT) 6 : Sensibilité et rétroactions du climat, page 82  
[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_FRENCH.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf)

[B3] GIEC, 5è rapport, GT1, 2013, Rapport complet, chapitre 7, aérosols et nuages, Figure 7-11 page 592

[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_Chapter07\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter07_FINAL.pdf)  
<http://www.ipcc.ch/report/graphics/index.php?t=Assessment%20Reports&r=AR5%20-%20WG1&f=Chapter%2007>

[B4] GIEC, 5<sup>e</sup> rapport, GT1, 2013, Résumé technique, Figure RT.6 page 54  
[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_FRENCH.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf)

[B5] GIEC, 5<sup>e</sup> rapport, GT1, 2013, Rapport complet, chapitre 7, aérosols et nuages, point 7.5.3 page 620  
[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_Chapter07\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter07_FINAL.pdf)

[B6] « Changements Climatiques : Atténuation du Changement Climatique », GIEC, 5<sup>e</sup> rapport, GT3, 2014  
Résumé technique, p 103-119  
[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WGIIIAR5\\_SPM\\_TS\\_Volume\\_fr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_fr.pdf)

#### Notes :

[I] La sensibilité climatique est le réchauffement terrestre induit à terme par un doublement des concentrations de gaz à effet de serre. Elle sert notamment à comparer les modèles entre eux.

Voir Sandrine Bony, Jean-Louis Dufresne. Processus régissant la sensibilité climatique. La. Météorologie, Météo et Climat, 2007, pp.29-32., pp.29-32 et LMD-IPSL CNRS-UPMC.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00184739/document>  
[www.insu.cnrs.fr/files/1744.pdf](http://www.insu.cnrs.fr/files/1744.pdf)

Sandrine Bony, Bjorn Stevens et David Carlson Comprendre les nuages pour anticiper les changements climatiques Organisation météorologique mondiale (OMM) Bulletin n° : Vol 66 (1) – 2017 (voir Enjeu No 1)  
<https://public.wmo.int/fr/ressources/bulletin/comprendre-les-nuages-pour-anticiper-les-changements-climatiques>

[II] Les nuages : quel rôle jouent-ils dans le climat ? UPMC Claudia Stubenrauch, directrice de recherche CNRS au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD, CNRS/ENS/École Polytechnique/UPMC). Interview.  
[http://www.upmc.fr/fr/recherche/actualites\\_de\\_la\\_recherche/dossiers\\_thematiques/les\\_sciences\\_du\\_climat\\_a\\_l\\_upmc/dans\\_les\\_airs/les\\_nuages\\_quel\\_role\\_jouent\\_ils\\_dans\\_le\\_climat.html](http://www.upmc.fr/fr/recherche/actualites_de_la_recherche/dossiers_thematiques/les_sciences_du_climat_a_l_upmc/dans_les_airs/les_nuages_quel_role_jouent_ils_dans_le_climat.html)

[III] Déclaration annuelle de mars 2017 de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) sur l'état du climat mondial en 2016  
<https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/nombreux-records-pulv%C3%A9ris%C3%A9s-en-2016-dans-le-domaine-du-climat-avec-des>

[IV] Agrégation de la convection dans un modèle de circulation générale : mécanismes physiques et rôle climatique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017. Thèse de doctorat de David COPPIN  
<http://hal.upmc.fr/tel-01596053/document>

[V] Comment les aérosols atmosphériques modifient-ils le climat ? Olivier Boucher 08 Août 2013 IPSL  
<http://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/aerosols-climat-par-olivier-boucher>

[VI] Bilan énergétique de la Terre et rôle de l'effet de serre – JeanLouis Dufresne LMD/IPSL; CNRS/UPMC (p 27 et 28)  
[www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/IUFM\\_Creteil/Dufresne\\_bil\\_serre\\_terre.pdf](http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/IUFM_Creteil/Dufresne_bil_serre_terre.pdf)

[VII] Actions internationales : Les solutions. Réseau Action Climat – MAJ 2017  
<https://reseauactionclimat.org/thematiques/international/>

[VIII] Le cri d'alarme de quinze mille scientifiques sur l'état de la planète LE MONDE | 13.11.2017  
[http://www.lemonde.fr/planete/article/2017/11/13/le-cri-d-alar-me-de-quinze-mille-scientifiques-sur-l-etat-de-la-planete\\_5214185\\_3244.html#SXQTvi8Pv7PuDXxX.99](http://www.lemonde.fr/planete/article/2017/11/13/le-cri-d-alar-me-de-quinze-mille-scientifiques-sur-l-etat-de-la-planete_5214185_3244.html#SXQTvi8Pv7PuDXxX.99)

[IX] Le GIEC et le sixième rapport d'évaluation - Septembre 2017  
[https://www.ipcc.ch/pdf/ar6\\_material/AC6\\_brochure\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/ar6_material/AC6_brochure_fr.pdf)

Rétroplanning du rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C  
[http://www.ipcc.ch/report/sr15/pdf/SR1.5\\_Schedule.pdf](http://www.ipcc.ch/report/sr15/pdf/SR1.5_Schedule.pdf)