

COMPRENDRE LA DIVERSITÉ DES RÉCIFS POUR MIEUX LES PROTÉGER

Pour bien protéger un écosystème, il faut en comprendre le fonctionnement. Aujourd'hui, la survie d'une majorité des récifs coralliens est menacée par la surpêche, les maladies, la pollution ou le réchauffement des océans. Certains, toutefois, résistent bien mieux que d'autres aux affres du climat et des stress anthropogéniques. Pourquoi observe-t-on une telle diversité des réponses au stress des communautés coralliennes ?

Dirigé par Stuart Sandin de l'institut Scripps d'océanographie à San Diego en Californie, un groupe de chercheurs dont

je fais partie essaie de répondre à cette question. Nous avons lancé le projet *100 Island Project Challenge* (littéralement le « Défi des 100 îles »). Il vise à mettre en place une expérience grandeur nature pour mieux comprendre les effets combinés des conditions océaniques, du climat et des activités humaines sur la structure et la dynamique des récifs coralliens.

Ainsi, nous sommes en train de recenser les espèces de coraux et de poissons vivant autour de 100 îles sélectionnées pour leurs profils uniques. Nous établissons des modèles en trois dimensions représentant 100 mètres carrés de huit récifs par île. Nous employons pour cela une technique – nommée *Structure from motion* en anglais – permettant de reconstruire un modèle en trois dimensions à partir d'un grand nombre de photographies. Sur les modèles établis par cette technique, la résolution est telle qu'il deviendra possible d'identifier les différents types de coraux et de les mesurer avec précision. Ces mesures seront faites directement au laboratoire par des chercheurs et par des étudiants, via une

interface s'apparentant à de la réalité virtuelle.

Chacun de ces modèles en voie d'étude peut contenir jusqu'à plusieurs milliers de colonies coralliennes. Nous pouvons ainsi étudier la biodiversité marine de chaque île, l'organisation dans l'espace des coraux et suivre avec précision la croissance, le rétrécissement ou la mort d'un million de colonies coralliennes. Finalement, nous pourrions bientôt corréler ces observations avec les conditions régnant dans l'océan, les conditions climatiques et la présence humaine connue. Bien entendu, les colonies seront revisitées plusieurs années de suite afin de suivre leurs évolutions. De telles informations sont cruciales dans le cadre de tout projet de conservation. Savoir à quoi un récif devrait ressembler sous des régimes climatiques donnés est essentiel pour qui souhaite le protéger ou doit le reconstruire. Les récifs coralliens n'ont plus souffert autant qu'aujourd'hui depuis longtemps, mais une chose est sûre : nous n'avons jamais été autant capables de les protéger !

YOAN EYNAUD

Institut Scripps, San Diego, États-Unis

> du sperme corallien applicable à un large éventail d'espèces coralliennes. Pour le moment, elle a stocké 16 espèces provenant du monde entier, soit environ 2% des quelque 800 espèces coralliennes qui existaient sur Terre d'après les estimations. Les spermatozoïdes décongelés ont des taux de fécondation comparables à ceux des spermatozoïdes frais et les embryons issus de la fécondation *in vitro* se développent en polypes juvéniles en bonne santé.

Mary Hagedorn a distribué ces germoplasmes, ou tissus vivants, dans les banques cryogéniques de divers pays. En théorie, ces banques sont capables de conserver ces tissus pendant des centaines, voire des milliers d'années. Les cellules pourront être décongelées un jour et servir à des projets d'élevage en mer ou en piscine. Les spermatozoïdes congelés serviraient par exemple à féconder des ovules venant de zones hors de leur territoire d'origine, et ainsi à introduire de nouveaux gènes dans un bassin génétique corallien. Les banques servent bien sûr aussi à préserver les espèces récifales susceptibles de décliner ou de disparaître.

Outre le sperme, Mary Hagedorn travaille aussi à cryopréserver des ovules et même des

larves entières. Elle espère y parvenir au cours des deux années à venir, puis elle s'attaquera à la cryoconservation de microfragments coralliens entiers. Son équipe développe aussi des techniques de cryopréservation de testicules de poissons afin d'aider à préserver la diversité des poissons récifaux. Son objectif ultime est de construire un ensemble de banques hautement sécurisées rassemblant les germoplasmes – ovules, spermatozoïdes, embryons... – des coraux et des autres espèces récifales en danger. « Nous n'avons aucune idée de ce que la science sera capable d'accomplir dans un siècle », estime-t-elle.

Ces différentes pistes peuvent surprendre. Nombre d'entre elles doivent encore être mises à l'épreuve, et de nombreuses interrogations subsistent quant à leur applicabilité à grande échelle, à leurs coûts et aux conséquences écologiques de la manipulation des systèmes récifaux. Toutefois, les risques de l'inaction sont connus : de fortes menaces pèsent sur les coraux et les nombreuses espèces qui en dépendent. Bien sûr, le premier défi reste de réduire les activités humaines responsables de ces menaces : les émissions de gaz à effet de serre, la pollution et la surpêche. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. P. Hughes *et al.*, **Global warming and recurrent mass bleaching of corals**, *Nature*, vol. 543, pp. 373–377, 2017.

P. J. Edmunds *et al.*, **Persistence and change in community composition of reef corals through present, past, and future climates**, *Plos One*, article e107525, 2014.

Projet de l'Académie des sciences de Californie pour les récifs coralliens : www.calacademy.org/explore-science/hope-for-reefs

Projet des microfragments du laboratoire marin Mote : <https://mote.org/research/program/coral-reef-restoration>

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS
LES NUMÉROS
DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ
VOTRE COLLECTION
SUR www.pourlascience.fr



Les nuages, amplificateurs du réchauffement

Quel rôle jouent et joueront les nuages dans le réchauffement climatique en cours ? Les observations et modélisations commencent enfin à apporter des réponses convergentes à cette question complexe. Des réponses qui ne sont pas vraiment rassurantes.

L'ESSENTIEL

> Pour prédire avec précision à quel point le changement climatique réchauffera la Terre, il faut déterminer l'influence des nuages. Or les modèles climatiques ont des difficultés à simuler les processus où les nuages interviennent.

> Des données satellitaires suggèrent que les nuages d'altitude vont s'élever davantage, que les bandes

nuageuses et dégagées se décaleront vers les pôles et que les nuages pourraient s'appauvrir en glace et s'enrichir en eau liquide.

> D'après les données, les effets des nuages qui amplifient le réchauffement climatique sont intenses et ceux qui l'atténuent sont plus faibles que prévu.

L'AUTEURE



KATE MARVEL
climatologue
à l'université
Columbia,
aux États-Unis,
et à l'institut
Goddard de la Nasa



Il est difficile de déterminer l'influence climatique des nuages, en raison notamment de leur diversité et des multiples échelles mises en jeu.

© Michael Turek, Gallery Stock

Je déteste les nuages. Non pas parce qu'ils apportent parfois la pluie, mais parce qu'ils donnent du fil à retordre, à nous autres climatologues. Les nuages sont de toutes formes et de toutes tailles: cirrus élevés et vaporeux, cumulus joufflus, stratocumulus en couches grises et basses qui assombrissent le jour... Cette grande diversité fait qu'il est difficile de prédire comment les nuages, sur toute la planète, vont réagir aux changements de l'atmosphère terrestre.

Les climatologues comme moi savent, grâce à une multitude de données, que la Terre se réchauffera au cours de ce siècle et au-delà. Mais nous avons du mal à cerner avec précision l'amplitude de ce réchauffement: peut-être un degré de plus? Ou deux degrés, voire trois ou quatre? La réponse dépend en grande partie des nuages. Le changement climatique modifie la répartition des nuages, ce qui pourrait ralentir ou accélérer le réchauffement global. La connaissance du résultat serait extrêmement utile pour guider les actions entreprises aujourd'hui et celles de demain.

De grandes équipes de spécialistes ont développé plus d'une vingtaine de modèles complexes du climat, testés avec un grand nombre de données climatiques. Tous ces modèles montrent que la Terre se réchauffe en réaction aux émissions actuelles de gaz à effet de serre. Mais pendant des années, ces différents modèles étaient obstinément en désaccord pour ce qui concerne les nuages. La situation est en train de changer: les simulations des effets exercés par les nuages commencent à converger. Des données satellitaires et d'autres observations commencent à révéler comment les changements relatifs aux nuages modifient le climat planétaire. Ces nouveaux aperçus accroissent nos inquiétudes, comme nous allons le voir.

RÉTROACTIONS POSITIVES OU NÉGATIVES

Imaginons la Terre juste avant la Révolution industrielle. Partout, on a abattu des forêts pour les remplacer par des pâturages et des villes. Cependant, la concentration du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère est restée stable à environ 280 parties par million (ppm). ➤

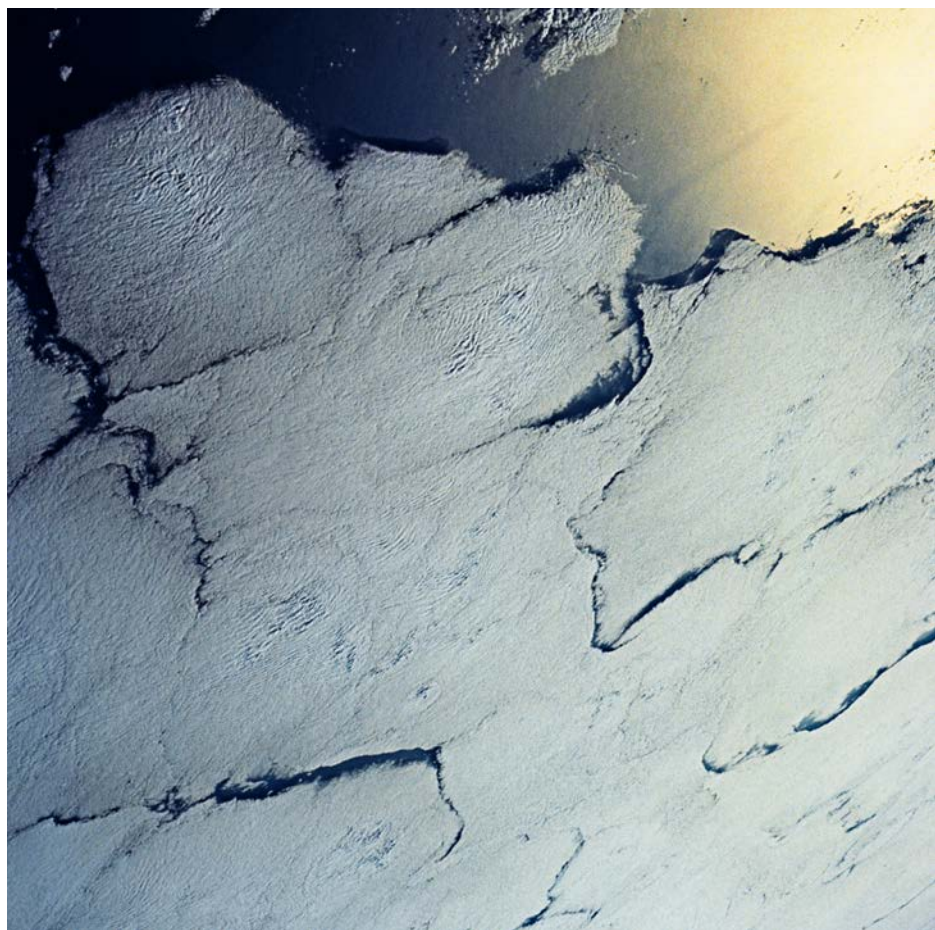
> Puis vient le moteur à combustion interne. Avançons rapidement jusqu'à la fin des années 1900: la concentration en CO_2 a grimpé en flèche. En 2017, elle a dépassé 400 ppm. Ce choc a des répercussions planétaires. La troposphère, qui contient l'air que nous respirons, se réchauffe. La circulation atmosphérique de l'air et de la vapeur d'eau commence à changer. Compte tenu des tendances actuelles, la concentration atmosphérique en CO_2 doublera vers 2050, par rapport aux valeurs préindustrielles. Le réchauffement s'accroîtra. Enfin, après plusieurs centaines d'années, la planète atteindra un nouvel équilibre à une température plus élevée.

La réaction de la planète, en termes de température, au doublement de la concentration en CO_2 est appelée sensibilité du climat à l'équilibre, ou ECS (de l'anglais *equilibrium climate sensitivity*). Tous les modèles climatiques indiquent que l'ECS est supérieure à zéro: nous devrions nous attendre à un réchauffement. Mais l'ampleur du réchauffement qu'ils prédisent va d'environ 2°C à $4,5^\circ\text{C}$, – des valeurs qui s'échelonnent entre le significatif et le catastrophique.

Si les modèles ne concordent pas sur ce chiffre, c'est en grande partie parce qu'ils sont en désaccord sur l'effet des nuages. En le cernant mieux, on pourra faire une prévision plus précise. Mais l'étude de l'influence des nuages est difficile pour deux raisons. D'abord, l'impact du réchauffement sur les nuages dépend de leur nature. Ensuite, les changements ainsi induits dans la couverture nuageuse agissent en retour sur le réchauffement, et ce de diverses façons.

Cette interaction à double sens est une «rétroaction». Certaines rétroactions climatiques sont bien connues. La glace de mer, par exemple, est d'un blanc brillant et réfléchit donc la plus grande partie du rayonnement solaire incident vers l'espace; mais quand elle fond, elle devient plus sombre et ne réfléchit plus autant le rayonnement. L'air se réchauffe alors davantage, ce qui fait fondre plus de glace réfléchissante et expose plus d'eau sombre, qui réfléchit encore moins de rayonnement solaire, et ainsi de suite: un cycle de rétroaction s'établit et accélère le réchauffement global. Nous comprenons bien cette rétroaction dite positive, et la plupart des modèles sont à peu près d'accord sur son rôle dans le changement climatique.

Comprendre les rétroactions liées aux nuages est plus difficile. Les climatologues ont classé grossièrement les nuages en les regroupant par caractères distinctifs. Deux propriétés fondamentales sont leur altitude et leur opacité. Les nuages bas peuvent être relativement transparents, comme certaines bouffées de vapeur présentes lors d'une journée ensoleillée, ou opaques, comme les épaisses couches



Les nuages (ici au-dessus de l'océan Pacifique) couvrent en permanence plus de 70 % de la surface du globe.

de brume côtière. Les nuages élevés, eux aussi, vont de petits filets, à travers lesquels passe presque tout le rayonnement solaire, jusqu'aux «enclumes» qui obscurcissent le ciel au cours d'un orage.

Cette taxonomie est utile, car elle met en lumière les principales façons dont les nuages réchauffent ou refroidissent la planète. Certains nuages renforcent l'effet de serre. Ils piègent une partie de la chaleur émanant de la Terre; sans eux, la planète serait plus froide. Les nuages contenus dans les couches supérieures froides de l'atmosphère sont particulièrement efficaces à cet égard.

D'autres nuages ont l'effet opposé: ils empêchent la lumière du Soleil d'atteindre la surface de la Terre et maintiennent la planète au frais. C'est en particulier le cas des nuages bas et épais. Dans le climat actuel, cette influence est plus forte que l'effet de serre dû aux nuages. De fait, le refroidissement net dû aujourd'hui aux nuages est considérable: il est environ cinq fois plus important que le réchauffement dû au doublement de la concentration en CO_2 .

Cela signifie que même de légers changements dans la couverture nuageuse peuvent avoir de gros impacts. Ajoutez plus de nuages élevés et transparents qui laissent passer la



lumière solaire mais retiennent la chaleur, et la Terre se réchauffe. Ajoutez plus de nuages bas et opaques qui ne laissent pas passer la lumière du Soleil, et elle se refroidit. La migration des nuages a de l'importance, elle aussi; une redistribution des nuages réfléchissants, des latitudes tropicales et subtropicales ensoleillées vers les pôles froids et sombres, diminue leur pouvoir refroidissant.

L'altitude est un autre facteur. Si l'altitude des nuages élevés augmente pour atteindre celle des couches supérieures plus froides de l'atmosphère, leur effet de serre s'accroît. Mais dans une atmosphère plus chaude, la proportion de cristaux de glace par rapport aux gouttelettes d'eau pourrait diminuer dans les nuages froids, ce qui rendrait ces nuages plus humides et plus épais, donc plus efficaces pour bloquer la lumière solaire incidente.

Aucun de ces effets ne se produit isolément, et c'est pourquoi les modèles ont du mal à s'accorder. Certains montrent des rétroactions globales qui sont fortement positives, c'est-à-dire qui amplifient beaucoup le réchauffement. D'autres montrent des rétroactions globales faiblement négatives, qui diminuent légèrement le réchauffement. Les modèles qui prévoient la rétroaction positive globale la plus forte finissent par prédire une ECS située à l'extrémité supérieure de la fourchette 2-4,5 °C.

Une autre raison pour laquelle il n'est pas surprenant que les modèles simulent impar-

faitement les nuages est que les différents processus à l'œuvre vont des petites aux grandes échelles. La formation des nuages et leurs effets radiatifs impliquent de minuscules gouttelettes d'eau et cristaux de glace. La thermodynamique et les mouvements des masses nuageuses mettent en jeu des échelles plus grandes et, à l'échelle planétaire, les nuages recouvrent généralement plus de 70% de la Terre à chaque instant. Or, lorsque nous effectuons des simulations à partir d'un modèle

informatique, nous devons faire un choix: faire un zoom avant et simuler explicitement les mouvements turbulents des gouttelettes qui font que chaque nuage se forme et se dissipe dans une petite zone, ou bien simuler les mouvements à grande échelle des masses d'air ascendantes et descendantes qui répartissent la vapeur d'eau autour de la planète. Nous ne pouvons pas faire les deux, car suivre soigneusement le comportement de chaque gouttelette d'eau dans toute l'atmosphère et à tout instant nécessiterait une puissance de calcul beaucoup trop grande.

Nous essayons donc de combiner les petites et les grandes échelles, en sachant que cela nécessitera des compromis. Dans un modèle climatique global, on essaie de trouver des paramètres simplifiés permettant de décrire l'ensemble de ces comportements. Nous élaborons ces paramètres en nous fondant sur la physique de l'atmosphère et nous les testons et les améliorons en effectuant des comparaisons avec des modèles décrivant les plus petites échelles et exécutés sur de petites régions du globe. Néanmoins, il n'existe pas de façon parfaite de mélanger petites et grandes échelles.

NUAGES ÉLEVÉS, NUAGES BAS

Attaquons-nous au premier problème: les nuages de haute altitude. Les mesures nous donnent de bonnes raisons de penser que le changement climatique va réorganiser l'atmosphère et repousser vers le haut la frontière entre la troposphère – la basse atmosphère où se produisent les phénomènes météorologiques – et la stratosphère, juste au-dessus d'elle. Les nuages d'altitude, pensons-nous, vont s'élever avec cette frontière.

Mark Zelinka, du laboratoire américain Lawrence-Livermore, en Californie, a beaucoup travaillé sur les implications de cette élévation. Selon lui, comme la planète se réchauffe en raison des émissions de CO₂, elle pourrait se refroidir en dissipant de l'énergie sous la forme de rayonnement infrarouge vers l'espace. Si les nuages élevés restent à leur altitude habituelle, ils se réchaufferont comme l'atmosphère et, ce faisant, la quantité de chaleur qu'ils évacuent vers l'espace augmentera. Cependant, Mark Zelinka et d'autres spécialistes pensent que ces nuages s'élèveront de telle façon qu'ils conserveront à peu près leur température actuelle. En conséquence, ils n'émettraient pas autant d'énergie thermique excédentaire dans l'espace, ce qui réchaufferait encore plus l'atmosphère. Il s'agit ainsi d'une rétroaction positive: en s'élevant de plus en plus, les nuages d'altitude réduisent la capacité de la planète, en phase de réchauffement, à se refroidir.

Qu'en est-il à présent des nuages bas? Les modèles climatiques semblent s'accorder sur ➤

Les nuages ont des effets dont certains amplifient le réchauffement, tandis que d'autres l'atténuent

faitement les nuages est que les différents processus à l'œuvre vont des petites aux grandes échelles. La formation des nuages et leurs effets radiatifs impliquent de minuscules gouttelettes d'eau et cristaux de glace. La thermodynamique et les mouvements des masses nuageuses mettent en jeu des échelles plus grandes et, à l'échelle planétaire, les nuages recouvrent généralement plus de 70% de la Terre à chaque instant. Or, lorsque nous effectuons des simulations à partir d'un modèle

> le fait qu'un globe plus chaud signifie moins de nuages bas. Cependant, Mark Webb, climatologue au Met Office (le service météorologique du Royaume-Uni) et participant au *Cloud Feedback Model Intercomparison Project*, sait que l'affaire est plus compliquée. Pourquoi y aurait-il moins de nuages bas? Le mécanisme semble dépendre de la façon dont l'air humide des nuages bas est dilué par la convection ou la turbulence de l'air plus sec situé au-dessus. Selon Mark Webb, les modèles habituels n'ont pas la puissance de calcul nécessaire pour représenter directement ces processus locaux et finissent par en donner des approximations différentes. Les divers modèles montrent des changements plus ou moins importants dans la couverture nuageuse basse. Mais, fait décisif, la plupart d'entre eux prévoient des réductions. Or moins de nuages bas signifie moins de lumière solaire réfléchi vers l'espace – une rétroaction positive supplémentaire, qui amplifie le réchauffement.

Un autre effet encore est à considérer. La circulation globale de l'atmosphère est en grande partie régie par les différences d'ensoleillement et de température entre l'équateur et les pôles. L'air tropical chaud s'élève et, ce faisant, se refroidit. Les hauteurs du ciel atteintes, il commence à se déplacer latéralement vers les pôles, plus froids. En cours de route, il se refroidit suffisamment pour redescendre vers la surface, à une latitude d'environ 30 degrés, tout en se réchauffant et en s'asséchant. Au sol, on obtient des climats pluvieux sous la bande tropicale d'air qui s'élève et perd de l'eau en se refroidissant, tandis qu'on a des climats de type désertique sous les bandes où l'air descend.

Le changement climatique va modifier ce schéma. Les hautes latitudes septentrionales vont se réchauffer plus rapidement que les tropiques; ce phénomène, nommé amplification arctique, réduit la différence de température entre les pôles et l'équateur. Cette réduction, qui est déjà en cours, entraîne d'autres changements. Le fait le plus important, peut-être, est que les tropiques s'étendent, ce qui pousse en direction des pôles les bandes pluvieuses et les bandes sèches. Au sol, il s'ensuit que les zones marginales – les régions méditerranéennes, le Sahel, le Sud-Ouest américain – vont probablement devenir plus arides.

De fait, les observations satellitaires que j'ai analysées récemment avec Céline Bonfils, du laboratoire Lawrence Livermore, montrent que les zones de précipitations se déplacent exactement comme prévu. Si les nuages suivent cette migration, alors des couches de nuages réfléchissants pourraient se décaler des basses latitudes aux latitudes élevées, où le rayonnement solaire incident est plus faible, ce qui réduira leur effet refroidissant par rapport à

LES EFFETS DES CHANGEMENTS DANS LA COUVERTURE NUAGEUSE

Globalement, des changements de latitude ou d'altitude des nuages, ou dans leur composition en eau liquide et glace, peuvent entraîner un réchauffement ou un refroidissement. Certains des changements représentés ici sont déjà en cours, selon les données satellitaires. Jusqu'à présent, ils semblent conduire à un réchauffement, une tendance qui pourrait s'accroître.



Toutes choses égales par ailleurs, les nuages bas bloquent la lumière solaire incidente, d'où un effet de refroidissement. Les nuages élevés bloquent la chaleur montante, d'où un effet de réchauffement.



CHANGEMENT :
Davantage de nuages élevés se forment
EFFET :
Réchauffement

CELA ARRIVERA-T-IL ?
Probablement pas
L'AVONS-NOUS
DÉJÀ OBSERVÉ ? : Non

celui qu'ils exerçaient dans leur position habituelle au-dessus des tropiques.

Un autre facteur complique encore la situation et doit être pris en compte par les modèles climatiques améliorés: un monde plus chaud peut modifier la composition même des nuages. Les nuages sont formés de minuscules gouttelettes d'eau liquide et de cristaux de glace. Les nuages bas et épais sont riches en eau liquide et sont donc plus opaques que les nuages élevés et fins, riches en glace. En situation de réchauffement, une plus grande partie de la glace contenue dans les nuages élevés se transforme en liquide, ce qui les rend plus opaques et bloque une plus grande partie de la lumière solaire incidente. Avec ce dégel, les nuages de glace deviendront plus «juteux», selon les termes de Mark Zelinka, d'où une rétroaction négative qui limite le réchauffement.

UNE PRÉVISION PLUS POINTUE

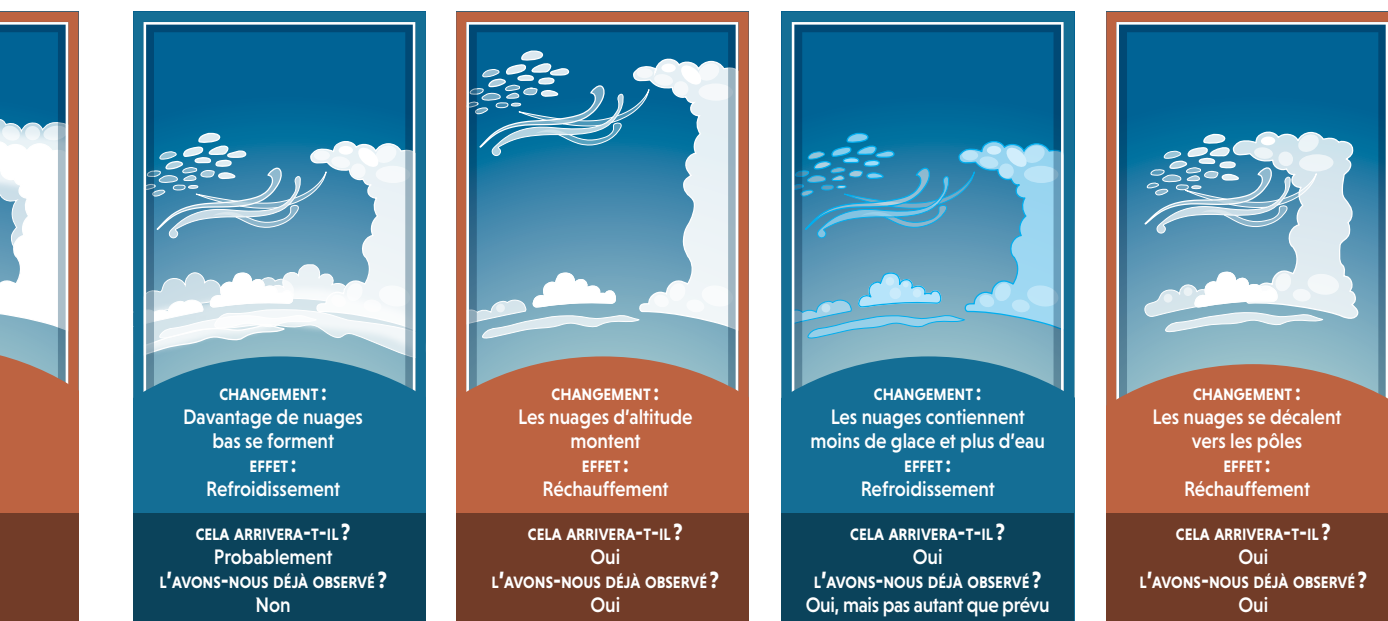
En raison de la nature changeante des nuages, il semble encore plus difficile pour les modèles climatiques d'affiner la prévision de la hausse des températures, c'est-à-dire de réduire la fourchette 2-4,5°C. Mais il existe à ce propos des observations révélant l'histoire de ce qui s'est déjà passé.

Les mesures portant sur les nuages ont en pratique débuté au moment où l'on a commencé à mettre des satellites météorologiques en orbite, dans les années 1980. Pour améliorer nos modèles, nous pouvons comparer leurs prévisions du climat actuel à ces mesures. Cependant, certaines des anciennes mesures effectuées par satellite peuvent poser problème. Les instruments d'imagerie embarqués

À PROPOS DE L'AUTEURE



KATE MARVEL est chercheuse au département de physique appliquée et mathématiques appliquées de l'université Columbia et à l'institut Goddard d'études spatiales de la Nasa. Elle a écrit dans divers magazines et tient un blog (<http://marvelclimate.blogspot.fr/>) ainsi qu'un site internet (www.marvelclimate.com).



dans les satellites d'observation de la Terre repèrent des nuages en recherchant des objets réfléchissants sur des fonds sombres, mais ils ont du mal à distinguer des objets blancs différents, en particulier des nuages glacés situés au-dessus d'un sol enneigé. En outre, des nuages élevés peuvent cacher des changements dans la couverture nuageuse plus basse.

Toutefois, nos observations se sont fortement améliorées cette dernière décennie, notamment grâce à l'*A-Train* (ou *Afternoon Constellation*) de la Nasa, un ensemble de six satellites d'observation de la Terre évoluant en orbites coordonnées. L'un d'entre eux, *CloudSat*, est équipé d'un radar dont les ondes pénètrent facilement les nuages, ce qui permet de déterminer les précipitations. Un autre, *Calipso*, est muni d'un «lidar», un analogue du radar pour le laser, qui permet de distinguer les aérosols des nuages et de déterminer avec précision l'altitude de ceux-ci et leur phase thermodynamique (cristaux de glace ou gouttelettes liquides).

Ces satellites ont amélioré notre compréhension de la couverture nuageuse et ont fourni des indices sur la façon dont les nuages pourraient changer dans le futur. Par exemple, les observations semblent appuyer l'idée selon laquelle les nuages d'altitude vont s'élever encore plus à mesure que la Terre se réchauffe, et réduiront ainsi la capacité de la planète de se refroidir par elle-même. Et une étude récente a montré qu'une partie seulement des nuages élevés contiennent effectivement plus d'eau et moins de glace. Cela signifie que la rétroaction négative associée aux nuages devenus plus «juteux» pourrait ne pas être aussi forte que nous l'avions pensé.

BIBLIOGRAPHIE

J. R. Norris et al., **Evidence for climate change in the satellite cloud record**, *Nature*, vol. 536, pp. 72-75, 2016.

K. Marvel et al., **External influences on modeled and observed cloud trends**, *Journal of Climate*, vol. 28(12), pp. 4820-4840, 2015.

O. Boucher et al., **Clouds and aerosols**, dans *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 5th Assessment Report of the IPCC* (sous la dir. de T. F. Stocker et al.), pp. 571-658, Cambridge University Press, 2013.

CloudSat et *Calipso* ayant été lancés en 2006, leurs données ne sont pas encore suffisantes pour que nous puissions détecter des effets du changement climatique se détachant du fond des fluctuations climatiques normales. Pour avoir plus de recul, les scientifiques regroupent des observations plus anciennes provenant de satellites météorologiques. Deux tentatives intéressantes sont à noter : l'*International Satellite Cloud Climatology Project* et le projet *Pathfinder Atmospheres-Extended*. Malgré les différences dans l'échantillonnage des instruments satellitaires et dans les instants de la journée auxquels les données ont été recueillies, ces enregistrements livrent des indications utiles, à condition de savoir où regarder. Dans une étude de 2015, Mark Zelinka et moi avons essayé.

Nous nous sommes d'abord posé une question simple : d'après ces observations, quelles sont les latitudes les plus nuageuses et celles qui sont les plus dégagées ? Comme prévu, nous avons trouvé un pic de nébulosité dans les tropiques. La couverture nuageuse était aussi relativement élevée dans d'étroites bandes sous des latitudes moyennes, où les tempêtes sont poussées par les vents dominants. Sous les latitudes «désertiques» subtropicales, la pression atmosphérique élevée engendre des conditions sèches et ensoleillées qui gênent la formation des nuages – ce sont les bandes les plus dégagées.

Nous avons ensuite cherché à savoir si les bandes les plus nuageuses et les bandes les plus dégagées ont changé de latitude au cours des enregistrements à long terme des satellites météorologiques, de 1984 à 2009.

> Ce que nous avons découvert est remarquable: les zones les plus nuageuses des latitudes moyennes et les zones les plus dégagées des latitudes subtropicales se décalent vers les pôles, exactement comme les modèles nous l'indiquaient. Qui plus est, chacun des ensembles indépendants de données était en accord avec l'idée que les changements de circulation atmosphérique tirent vers les pôles les zones de couverture nuageuse. En comparant avec ce qu'indiquent des modèles climatiques où ne sont pas intégrées les émissions humaines de gaz à effet de serre, nous avons établi que ces changements étaient trop importants pour être attribuables à la seule variabilité naturelle du climat. Et ces changements sont plus importants qu'on ne l'avait prévu.

Les implications sont inquiétantes. Si des couches de nuages bas, réfléchissants, se décalent trop vers les pôles, alors leur pouvoir de refroidissement sera notablement réduit: ils bloqueront en effet une lumière solaire faible, tempérée, au lieu d'une lumière solaire intense, tropicale. Cette migration du système nuageux constituerait une forte rétroaction positive et indiquerait une sensibilité du climat plus élevée.

Une étude ultérieure conduite par Joel Norris, de l'université de Californie à San Diego, qui a pris en compte des artéfacts connus dans les observations satellitaires, a aussi mis en évidence un décalage vers les pôles des couches nuageuses. Ces données suggèrent également que les nuages d'altitude pourraient s'élever. Les scientifiques débattent de la signification de ces changements et se demandent si ceux-ci peuvent être attribués aux émissions de gaz à effet de serre, à la variabilité naturelle du climat, aux particules rejetées dans l'atmosphère par l'éruption du mont Pinatubo ou à une combinaison de ces facteurs. Mais une chose est claire: les observations à long terme n'indiquent en aucune façon que les nuages vont ralentir le réchauffement climatique.

LES NUAGES NE NOUS SAUVERONT PAS

Ainsi, dans le tableau qui émerge de ces observations, les nuages d'altitude s'élèvent et les systèmes nuageux se déplacent généralement vers les pôles. Ces deux tendances devraient accélérer le réchauffement de la planète. Les observations à courte échelle de temps suggèrent que les nuages tropicaux bloqueront moins de lumière solaire, accroissant ainsi le réchauffement, et que les nuages en dégel pourraient constituer un plus faible frein au réchauffement qu'on ne l'avait imaginé. Il y a là peu de choses pour nous réconforter.

Faut-il alors penser que les nuages porteront le réchauffement plus près de l'extrémité supérieure de la fourchette de l'ECS? La

MIEUX COMPRENDRE LE RÔLE DES NUAGES D'ALTITUDE

Comme ils recouvrent environ 30 % du globe, les nuages de la haute troposphère jouent un rôle clé dans le bilan d'énergie de la Terre et dans le transport de la chaleur. Abondants sous les tropiques, ces nuages prennent la forme soit d'« enclumes » de cirrus résultant de mouvements de convection profonde, soit de cirrus lorsque l'air froid devient sursaturé en glace.

Le changement climatique modifiera la convection tropicale, donc les systèmes nuageux de la haute troposphère, ce qui aura un impact sur le chauffage de l'atmosphère. Or les changements dans des gradients de chauffage

influencent sur la circulation atmosphérique, d'où une modification des zones de précipitations intenses.

Reste que la relation entre les enclumes de cirrus et la convection est mal représentée dans les modèles climatiques. Pour élucider ces interactions complexes, il faut combiner observations satellitaires, analyses des transferts de chaleur et modélisations à différentes échelles.

Les systèmes convectifs et leur structure horizontale d'opacité sont obtenus à partir du sondeur infrarouge de la constellation de satellites A-Train, tandis que leur structure verticale est déterminée grâce aux instruments actifs (radar et lidar) d'A-Train. Cela a permis de relier la structure horizontale des enclumes à l'intensité de convection. Il semble que les tempêtes tropicales plus intenses contiennent relativement plus de cirrus fins dans leurs enclumes et autour; cela pourrait avoir un effet sur la circulation atmosphérique à grande échelle.

La prochaine étape sera de mener des simulations à différentes échelles pour reproduire ce comportement, en testant divers mécanismes relatifs à la formation et au maintien des enclumes.

CLAUDIA STUBENRAUCH
Laboratoire de météorologie dynamique/Institut Pierre-Simon-Laplace, Paris

C. J. Stubenrauch et al.,
Atmosph. Chem. Phys., vol. 17,
pp. 13625-13644, 2017.

sensibilité du climat à l'équilibre est une quantité théorique. Elle décrit la réaction finale du climat à un doublement rapide de la concentration atmosphérique en CO₂ – un scénario artificiel qui offre une voie bien réelle à explorer. L'augmentation de la concentration en CO₂ n'est cependant pas théorique; le doublement se produira vers le milieu du siècle si tous les pays restent sur leur lancée actuelle. Davantage d'observations satellitaires, des modèles de plus haute résolution et l'arrivée de jeunes scientifiques créatifs nous aideront à trouver la réponse à cette question brûlante: de combien de degrés la Terre se réchauffera-t-elle?

Entre-temps, un gros travail est à mener sur une autre quantité que les émissions de gaz à effet de serre, qui a elle aussi obstinément refusé de bouger: les 50% de la population états-unienne qui refusent d'admettre que l'humanité est en train de changer le climat (autour de 25% dans d'autres pays tels que le Canada et la France). En fin de compte, si les émissions de CO₂ se poursuivent sans répit, la Terre va beaucoup se réchauffer. Les nuages, semble-t-il, ne feront qu'aggraver le problème et, au mieux, ne l'allégeront en rien. C'est à l'humanité que cette tâche incombe. ■

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE** EN TOUTE LIBERTÉ



FORMULE
INTÉGRALE
-42%



8,20€*

FORMULE
PASSION
-28%



6,50€*

FORMULE
DÉCOUVERTE
-25%



4,90€*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** EN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE, JE CHOISIS MA FORMULE ET JE COMPLÈTE L'AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT CI-DESSOUS.

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
12 n° de Pour la Science + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

8,20€
Par mois
-42%
IPV8E20

☐ FORMULE **PASSION**
12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries

6,50€
Par mois
-28%
PPV6E50

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**
12 n° de Pour la Science

4,90€
Par mois
-25%
DPV4E90

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____@_____

J'accepte de recevoir les informations de **Pour la Science** ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

PAG18484STDP

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

IBAN _____

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Merci de joindre impérativement un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/06/2018 en France métropolitaine. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre. Photos non contractuelles.