

> 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

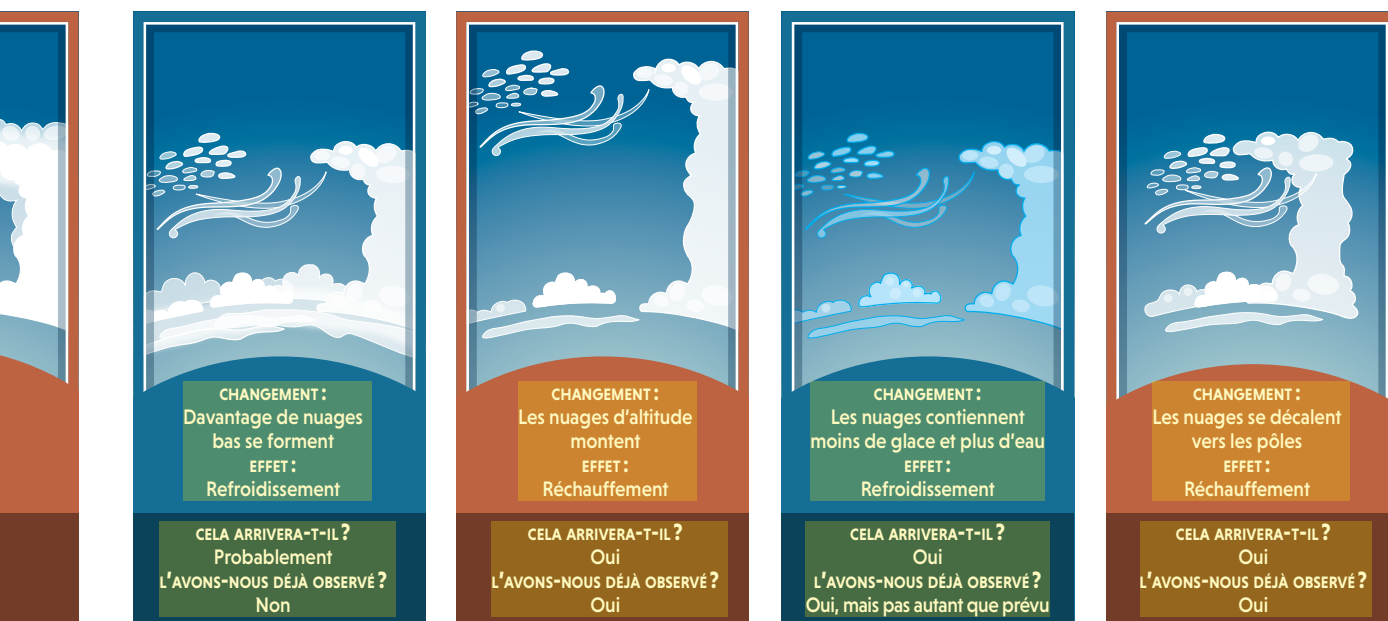
En raison de la nature changeante des nuages, il semble encore plus difficile pour les modèles climatiques d'affiner la prévision de la hausse des températures, c'est-à-dire de réduire la fourchette 2-4,5°C. Mais il existe à ce propos des observations révélant l'histoire de ce qui s'est déjà passé.

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'étalonnage 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.