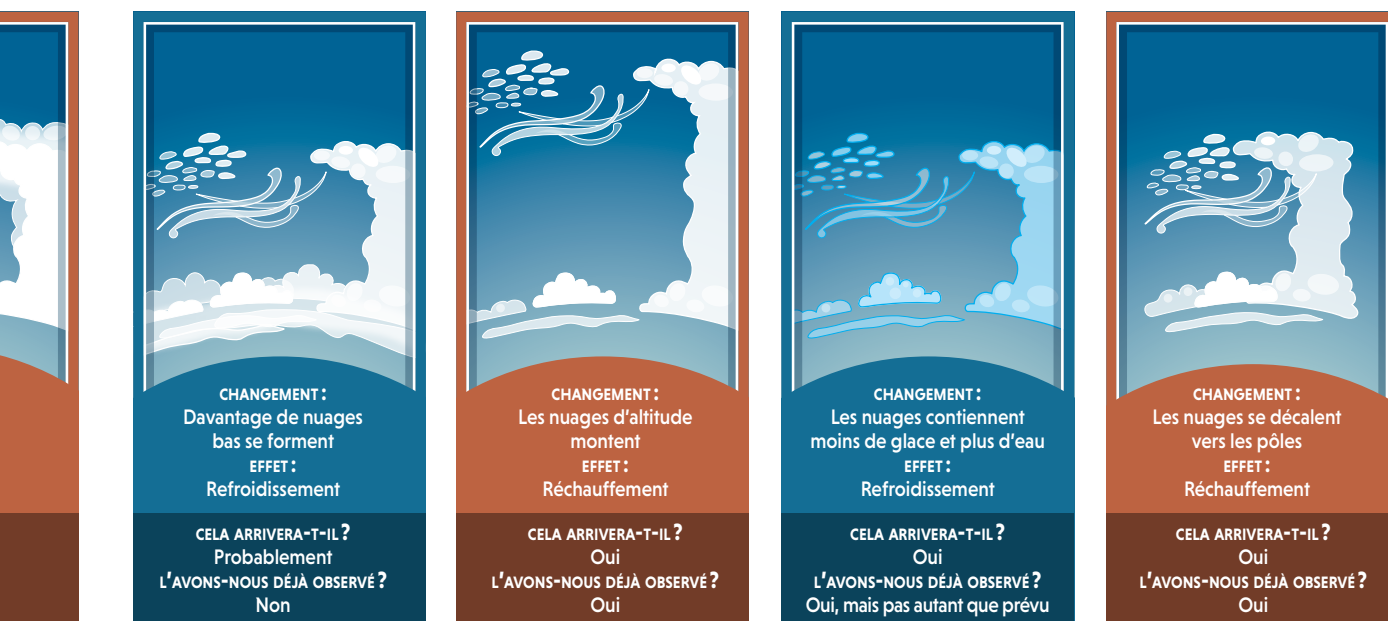




dans les satellites d'observation de la Terre repèrent des nuages en recherchant des objets réfléchissants sur des fonds sombres, mais ils ont du mal à distinguer des objets blancs différents, en particulier des nuages glacés situés au-dessus d'un sol enneigé. En outre, des nuages élevés peuvent cacher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

Y 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. ■