



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).