

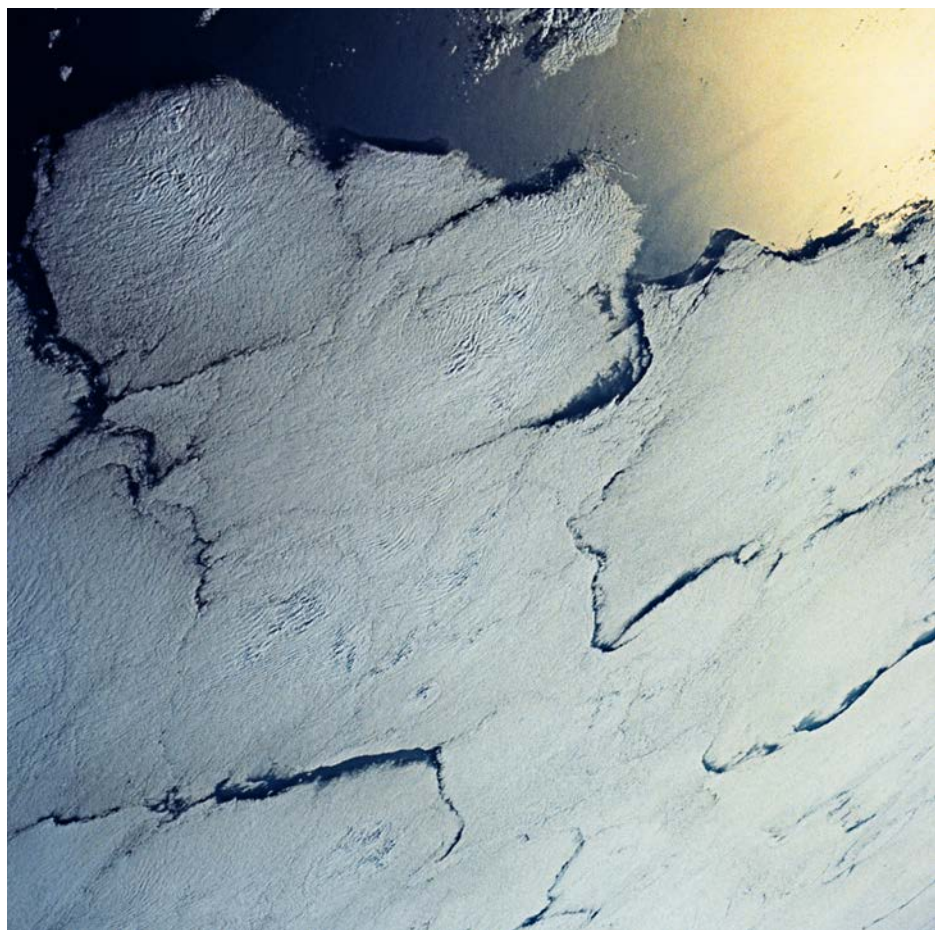
➤ Puis vient le moteur à combustion interne. Avançons rapidement jusqu'à la fin des années 1900: la concentration en CO_2 a grimpé en flèche. En 2017, elle a dépassé 400 ppm. Ce choc a des répercussions planétaires. La troposphère, qui contient l'air que nous respirons, se réchauffe. La circulation atmosphérique 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



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

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



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