8. Cycle de l'eau : les nuages

Sandrine Bony

La présence d'eau dans l'atmosphère se manifeste notamment par l'existence de nuages de tailles, formes et couleurs variables et changeantes dans le temps : tantôt blancs et cotonneux par beau temps, tantôt sombres et menaçants par temps orageux, les nuages constituent tout à la fois la signature « visuelle » de processus physiques fondamentaux pour le fonctionnement de la machine climatique (turbulence, convection atmosphérique, rayonnement), et des acteurs majeurs dans la circulation générale de l'atmosphère et la dynamique du climat.

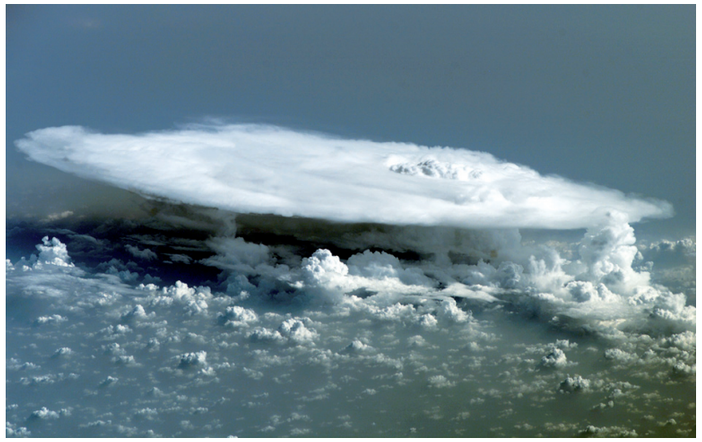

Fig. 1 – Photo d'un nuage convectif prise depuis la Station Spatiale Internationale.
© Image Science & Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center ■

La formation des nuages

La source fondamentale d'énergie du système climatique est le rayonnement solaire, absorbé principalement à la surface de la Terre, tandis que le puits d'énergie est l'émission de rayonnement infrarouge vers l'espace, principalement par l'atmosphère (Cf. II.2) : l'équilibre énergétique de cette configuration instable (chauffage de l'atmosphère par le bas et refroidissement par le haut) est assuré par un transport d'énergie de la surface terrestre vers l'atmosphère accompli par des mouvements turbulents (dans les premiers km de l'atmosphère) et convectifs (jusqu'à environ 10-20 km selon la latitude). Sous l'effet de ces mouvements verticaux, la vapeur d'eau transportée en altitude se refroidit jusqu'à former des gouttelettes d'eau liquide ou des cristaux de glace dont l'accumulation forme un nuage. A mesure que les gouttes et cristaux se forment, ils grossissent par coalescence. Lorsqu'ils deviennent trop lourds pour rester en suspension dans l'atmosphère, ils tombent en produisant des précipitations sous forme de pluie ou de neige. La condensation suivie de précipitations contribue très efficacement à chauffer l'atmosphère.

Cette description de la formation des nuages est évidemment ultra simplifiée et ne rend pas compte de toute la complexité des phénomènes : par exemple, les nuages d'orage sont le siège de mouvements ascendants mais aussi de courants descendants induits par l'entrainement turbulent à l'intérieur du nuage d'air plus sec ou par le refroidissement généré par la ré-évaporation partielle de la précipitation au cours de sa chute. Ces courants descendants stabilisent l'atmosphère mais génèrent également des poches d'air froid près de la surface susceptibles de soulever de nouvelles masses d'air (et donc de nouveaux nuages) à proximité.

Le rôle des nuages dans la machine climatique

Les nuages constituent les principaux modulateurs du bilan radiatif terrestre. D'une part ils réfléchissent le rayonnement solaire et tendent ainsi à refroidir la Terre (effet parasol), d'autre part ils absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre et les basses couches de l'atmosphère et ré-émettent vers l'espace un rayonnement infrarouge plus faible, contribuant ainsi à l'effet de serre. L'impact relatif des nuages sur les rayonnements solaire et infrarouge dépend de la quantité et de la phase (liquide ou glace) de l'eau condensée, de la taille des gouttes, de la forme des cristaux et de la répartition horizontale et verticale des hydrométéores. Depuis la fin des années 1980, les mesures satellites ERBE, ScaRaB, CERES montrent qu'en moyenne l'effet parasol des nuages l'emporte sur leur effet de serre. Les nuages refroidissent donc le climat. Toutefois, leurs effets radiatifs sont très variables géographiquement et verticalement, et dépendent fortement du type de nuage et des conditions météorologiques qui leurs sont associées. Ainsi les nuages bas de types stratus, stratocumulus ou petits cumulus de beau temps exercent un faible effet de serre mais un fort effet parasol, tandis que les cirrus (fins et très hauts en altitude) exercent un faible effet parasol mais un fort effet de serre. Les nuages convectifs de grande extension verticale, quant à eux, exercent de forts effets solaire et infrarouge qui se compensent quasiment parfaitement au sommet de l'atmosphère mais provoquent un chauffage significatif à l'intérieur de la troposphère et un refroidissement à la surface de la Terre.

Par les changements de phase et les impacts radiatifs qui leur sont associés, les nuages jouent un rôle majeur dans l'énergétique de l'atmosphère et la machine climatique. Outre leur impact sur la température moyenne de la Terre – qui serait plus élevée en leur absence – ils affectent les transports d'énergie entre l'équateur et les pôles, l'intensité de la circulation atmosphérique de Hadley-Walker dans les Tropiques, les modes de variabilité naturelle de l'atmosphère, l'intensité des pluies, etc. La qualité de la représentation des nuages dans les modèles de simulation du climat influence donc beaucoup la qualité des simulations de ces modèles.

De plus, les nuages jouent un rôle critique dans la réponse du climat à une perturbation externe, qu'elle soit d'origine naturelle ou anthropique. Ainsi, lorsque le CO_2 atmosphérique augmente, selon la façon dont la couverture nuageuse et ses propriétés optiques répondent et rétroagissent sur les changements dynamiques et thermodynamiques de l'atmosphère, l'impact radiatif des nuages peut s'atténuer ou au contraire s'accentuer à mesure que le climat se réchauffe, jouant alors un rôle stabilisateur (rétroaction négative) ou au contraire amplificateur (rétroaction positive) sur l'amplitude du réchauffement global. Jusqu'à présent, les modèles de simulation du climat ne montrent aucun consensus sur la réponse des nuages et de leurs effets radiatifs au changement climatique.

Les différences de réponse des nuages au réchauffement climatique, et des nuages de couche limite en particulier, constituent la principale cause d'incertitude sur l'estimation de la sensibilité climatique. Un changement dans la concentration de l'air en aérosols peut également modifier l'impact radiatif des nuages en changeant le nombre de noyaux de nucléation et la taille des gouttelettes (Cf. V-6). Toutefois, il s'agit le plus souvent d'une perturbation de deuxième ordre sur les propriétés nuageuses par rapport à l'effet des changements de conditions météorologiques.

Conclusion

La représentation des nuages dans les modèles atmosphériques constitue une composante essentielle de la modélisation du climat. Les processus nuageux se produisant sur une vaste gamme d'échelles spatiales (du micromètre au millier de km), ils doivent être représentés en partie au moyen de « paramétrisations » dans les modèles globaux de simulation du climat. Les progrès continus de la recherche en matière de compréhension des mécanismes physiques, de modélisation numérique à méso-échelle et d'observations (*in situ* et spatiale) ont déjà permis de donner des bases considérablement plus physiques que par le passé à ces paramétrisations. De nombreux progrès restent à faire cependant, tant dans la représentation des processus physiques que dans la compréhension et l'évaluation des mécanismes de rétroaction associés aux nuages lors d'un changement climatique.

Références bibliographiques

- S. BONY and J.-L. DUFRESNE - *Processus régissant la sensibilité climatique*. La Météorologie, 56, 2007.
- R. KANDEL et Y. FOUQUART - *Le bilan radiatif de la terre.* La Recherche, 23, 1992.
- G. PRETOR-PINNEY et J. COPPEL-GROZDANOVITCH - *Le guide du chasseur de nuages*, Points Seuil Sciences, 2008.
- F. ROUX - *Les orages. Météorologie des grains, de la grêle et des éclairs*. Documents Payot, 1991.