



Vers des Modèles Couplés Océan- Atmosphère

Denis Gilbert
Department of Oceanography
Dalhousie University
Halifax, Nova Scotia B3H 4J1

Present Address
Institut Maurice Lamontagne
C.P. 1000
Mont-Joli, Québec G5H 3Z4

RÉSUMÉ

Le climat terrestre est régi par des interactions complexes entre l'Océan, l'Atmosphère et la Cryosphère (neige, glace, glaciers). Le phénomène ENSO (El Niño-Southern Oscillation), qui ne représente qu'un type connu d'interaction Océan-Atmosphère, est brièvement décrit. Le rôle des océans en tant que tampon thermique capable de ralentir le réchauffement (ou refroidissement) de l'atmosphère est également discuté. Finalement, quelques-uns des points faibles des modèles climatiques présents et futurs sont mentionnés.

ABSTRACT

The Earth's climate is determined by complex interactions between the Ocean, the Atmosphere and the Cryosphere (snow, sea ice, glaciers). The ENSO phenomenon (El Niño-Southern Oscillation), which represents but one known type of Ocean-Atmosphere interaction, is briefly described. The role of the oceans as a heat buffer capable of slowing down the warming (or cooling) of the atmosphere is also discussed. Finally, some of the weaknesses of current and future climate models are also mentioned.

LE PHÉNOMÈNE ENSO

Les océans interagissent avec l'atmosphère sur des échelles de temps allant de quelques secondes à plusieurs dizaines de milliers d'années (Broecker and Denton, 1989). Le phénomène ENSO (El Niño-Southern Oscillation) nous fournit un exemple d'interaction Océan-Atmosphère se produisant sur une échelle de temps de l'ordre de quelques années. Le principal symptôme océanographique de ce phénomène consiste en un

réchauffement de plusieurs degrés Celsius des eaux de surface du Pacifique Équatorial Est, et le principal symptôme météorologique consiste en un affaiblissement des vents alizés dans la région du Pacifique équatorial central. La partie ascendante de la cellule de Hadley¹ se trouvant normalement près de l'Indonésie migre alors de quelques milliers de kilomètres vers l'Est, et cela affecte les conditions climatiques un peu partout à la surface du Globe. L'ENSO de 1982-83 fut particulièrement intense, causant de graves inondations dans certaines régions du Chili, une sécheresse record en Australie, de fortes tempêtes accompagnées d'érosion côtière en Californie, et la quasi disparition de la pêche aux anchois au large du Pérou entre autres catastrophes (Enfield, 1989).

Dans leurs tentatives de simuler ce phénomène à l'aide de modèles numériques non-couplés, météorologues et océanographes ont recours à des stratagèmes fort différents, les météorologues tentant de déterminer comment l'atmosphère réagit face à des changements de conditions océaniques, tandis que les océanographes s'attaquent au problème contraire. Ainsi dans les modèles météorologiques, c'est le réchauffement des eaux de surface du Pacifique Équatorial Est qui cause l'affaiblissement des vents alizés, alors que dans les modèles océanographiques, c'est l'inverse qui se passe. On se retrouve donc aux prises avec la question de la poule et de l'oeuf, et il devient clair que si l'on désire modéliser le phénomène ENSO correctement, on ne peut pas se permettre de traiter l'Atmosphère et l'Océan de façon séparée. En rapport avec l'effet de serre et la question climatique, c'est là la principale leçon que météorologues et océanographes ont retenue. Ils reconnaissent maintenant mieux que jamais que l'Océan et l'Atmosphère sont intimement liés, qu'ils forment un système couplé et ne cessent de s'influencer l'un l'autre.

TRANSPORT DE CHALEUR PAR LES OCÉANS

Afin de souligner une fois de plus les liens étroits existant entre l'Océan et l'Atmosphère, mentionnons que l'intensité des courants marins comme le Gulf Stream (Océan Atlantique) ou le Kuroshio (Océan Pacifique) est en fait déterminée par les vents atmosphériques. Plus précisément, le volume d'eau transporté par ces courants est relié à la variation latitudinale de la composante Est-Ouest des vents atmosphériques (Pond and Pickard, 1983, p. 134).

¹ La cellule de Hadley consiste essentiellement en une ascension d'air chaud et humide près de l'équateur, suivi d'une migration de cet air vers le Nord ou le Sud jusqu'à environ 30° de latitude, où l'air redescend en s'asséchant, puis retourne vers l'équateur.

Or dans l'éventualité où le contraste de température entre les hautes et basses latitudes serait réduit par une augmentation du CO₂ atmosphérique (tel que prédit par les modèles climatiques), on peut s'attendre à ce que les vents aux latitudes moyennes diminuent d'intensité. En principe cela pourrait mener à une diminution du volume d'eau transporté par les courants océaniques. Qu'advierait-il alors au transport méridional de chaleur (transport de chaleur des régions tropicales vers les régions polaires) effectué par ces derniers? Diminuerait-il aussi, contrebalançant ainsi partiellement la réduction du contraste de température entre hautes et basses latitudes postulée ci-haut?

Il s'agit là d'une question importante, car les courants marins comme le Gulf Stream transportent une grande quantité de chaleur des basses latitudes vers les hautes latitudes. Une estimation indirecte du transport méridional de chaleur effectué par les Océans montre qu'il est en fait comparable à celui effectué par l'Atmosphère dans le climat actuel (Carissimo *et al.*, 1985), mais il n'en fut pas nécessairement toujours ainsi (Newell, 1974).

INERTIE THERMIQUE DES OCÉANS

En Mécanique Classique, le concept de masse ou inertie sert à décrire la résistance d'un corps à changer de vitesse. De la même manière, en Thermodynamique, le concept d'*inertie thermique* sert à décrire la résistance d'un corps à changer de température. Il se trouve que l'inertie thermique des océans est beaucoup plus grande que celle de l'atmosphère, et il y a deux raisons principales à cela. Tout d'abord, la chaleur massique de l'eau (i.e. la quantité d'énergie qu'il faut fournir pour élever la température de 1 gramme d'eau de 1°C) est environ 4 fois supérieure à celle de l'air. Ensuite, la masse à proprement parler des océans est à peu près 400 fois supérieure à celle de l'atmosphère. Combinant ces deux facteurs ensemble, on arrive à la conclusion que l'inertie thermique totale des océans est environ 1600 fois supérieure à celle de l'atmosphère. En mots simples, ceci revient à dire que les océans sont beaucoup plus difficiles à réchauffer (ou refroidir) que l'atmosphère. Il apparaît donc plausible que les océans soient capables de ralentir le réchauffement climatique auquel on pourrait s'attendre en raison de l'augmentation du CO₂.

Jusqu'à tout récemment, les modèles numériques de prédiction climatique (Washington and Parkinson, 1986) ont utilisé une version fort simpliste des océans n'incluant que sa couche superficielle mélangée, tenue fixe à 50m d'épaisseur. Divers groupes de recherche à travers le monde se livrent présentement une course contre la montre afin de mettre au point une représentation plus réaliste des océans, dans ce qu'il est convenu d'appeler des modèles couplés océan-atmosphère. Dans de tels modèles, l'inertie

thermique des océans sera grandement augmentée par rapport aux modèles climatiques précédents. Nous serons donc mieux en mesure d'évaluer le rôle que peuvent jouer les océans en tant que *tampon thermique* dans l'évolution du climat terrestre, c'est à dire évaluer la possibilité que les océans puissent arriver à ralentir le réchauffement de l'atmosphère en absorbant eux-mêmes une grande partie de la chaleur "créée" par l'effet de serre.

QUELQUES RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES ET MISES EN GARDE

Avec un océan à 4 niveaux verticaux, Washington and Meehl (1989) obtiennent un réchauffement de l'atmosphère d'environ 1.6°C, 30 ans après un doublement soudain en CO₂, soit beaucoup moins que ce que leur modèle avec une simple couche mélangée de 50 m d'épaisseur prédisait (3.5°C). Stouffer *et al.* (1989) prédisent quant à eux une asymétrie marquée entre le réchauffement de l'hémisphère Sud et celui de l'hémisphère Nord, et ce en utilisant une représentation plus détaillée des océans et une augmentation *graduelle* en CO₂ de 1 % par année. Au moment où la concentration en CO₂ a doublé, leur modèle prédit un réchauffement moyen d'environ 1.5°-2°C dans l'hémisphère Sud, comparativement à 3°-4°C dans l'hémisphère Nord. L'hémisphère Sud se réchaufferait donc plus lentement que l'hémisphère Nord. Cela serait dû à la plus grande inertie thermique de l'hémisphère Sud, attribuable en partie à la plus grande superficie qui y est occupée par les océans (85 % mer, 15 % terre contre 57 % mer, 43 % terre dans l'hémisphère Nord), et en partie à une ventilation plus vigoureuse de la thermocline principale océanique dans la région du courant circumpolaire Antarctique.

Avant de prendre ces prédictions trop au sérieux cependant, certaines mises en garde s'imposent. Tout d'abord, il faut comprendre que les super-ordinateurs d'aujourd'hui et de demain ont et auront toujours des capacités de calcul limitées. Il en suit que les modèles numériques de prédiction climatique ont et auront toujours des résolutions horizontales et verticales limitées. Par exemple, le modèle couplé Océan-Atmosphère de Stouffer *et al.* (1989) a une *grosseur de maille* (résolution horizontale) d'environ 415 km × 500 km (longitude × latitude), ce qui ne lui permet pas de reproduire fidèlement les tourbillons océaniques produits par le Gulf Stream ou autres courants marins, ces tourbillons étant généralement plus petits que 400 km. Ceci nous mène à parler d'un problème plus général : celui de la paramétrisation des processus physiques non-explicitement résolus par les modèles climatiques.

PROBLÈME DES MODÈLES PRÉSENTS ET FUTURS : LA PARAMÉTRISATION DES PROCESSUS À PETITE ÉCHELLE

Tout phénomène atmosphérique ou océanique se produisant à une échelle spatiale plus petite que la grosseur de maille d'un modèle numérique doit être *paramétrisé* d'une manière ou d'une autre. Cette paramétrisation doit généralement être faite en fonction de variables qui sont quant à elles évaluées à l'échelle de la grosseur de maille, ce qui cause de graves problèmes en ce sens qu'on sait rarement comment faire cela de façon adéquate. Un nombre inquiétant de paramètres sont par conséquent souvent choisis pour la seule et unique raison qu'ils permettent de bien reproduire le climat actuel. Ces paramètres sont des boutons de réglage, et on ne sait pas très bien comment réajuster ces boutons au fur et à mesure que le système Océan-Atmosphère-Cryosphère change.

À titre d'exemple seulement, notons que le modèle de Stouffer *et al.* (1989) ne comporte que 12 niveaux verticaux dans sa représentation de l'océan. Cela les a obligé à utiliser une diffusivité tourbillonnaire verticale (bouton de réglage) de 20 cm²s⁻¹. Les océanographes savent très bien que cette valeur est de 10 à 100 fois plus élevée qu'en réalité, mais elle a tout de même été utilisée pour s'assurer de la stabilité numérique de la simulation. Des diffusivités tourbillonnaires horizontales (autres boutons de réglage) plus élevées qu'en réalité sont également utilisées pour des raisons de stabilité numérique. On s'aperçoit donc rapidement qu'il y a beaucoup d'artificiel dans ces fameux modèles climatiques.

Toujours à titre d'exemple, il importe de dire qu'avec une grosseur de maille de quelques centaines de kilomètres, les modèles climatiques sont incapables de simuler directement la formation de nuages convectifs comme les cumulus ou cumulo-nimbus. Cela explique en partie pourquoi ces modèles n'arrivent pas très bien à reproduire les patrons de précipitation du climat présent même s'ils en reproduisent assez bien les patrons de température. La plus grande source d'incertitude quant au réchauffement futur de la planète provient d'ailleurs des nuages : le réchauffement prédit varie de plus de 300% tout dépendant de la *paramétrisation* utilisée pour les nuages!

Quelques-uns des facteurs potentiellement importants dans cette paramétrisation incluent la hauteur des nuages, leur forme, la grosseur des gouttes dont le nuage est composé, et la présence d'impuretés dans les gouttes (qui pourrait augmenter dû à la pollution). Tous ces facteurs déterminent ensemble les propriétés radiatives du nuage (*i.e.*, le pourcentage de radiation solaire réfléchi vers l'espace et la quantité de radiation infrarouge émise vers le sol). Pour illustrer jusqu'à quel point la microphysique des nuages est importante, Mitchell *et al.* (1989) ont démon-

tré que si l'on tient uniquement compte des changements de phase (liquide « solide) de l'eau à l'intérieur des nuages, le réchauffement de l'atmosphère suite à un doublement du CO₂ pourrait chuter de 5.2°C à 1.9°C!

Je termine cet article en espérant que le lecteur aura compris que des ordinateurs plus puissants ne sont pas la solution à tous nos maux en ce qui a trait à la modélisation de l'effet de serre. Dans 10 ou 20 ans, nous devons toujours faire face à l'épineux problème de la paramétrisation des processus à petite échelle. On aura toutefois changé le mal de place, la grosseur de maille des modèles ayant peut-être alors passé de quelques centaines de kilomètres à quelques dizaines de kilomètres grâce aux progrès de l'électronique.

RÉFÉRENCES

- Broecker, W.S. and Denton, G.H., 1989, The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 53, p. 2465-2501.
- Carissimo, B.C., Oort, A.H. and Vonder Haar, T.H., 1985, Estimating the meridional energy transports in the Atmosphere and Ocean: *Journal of Physical Oceanography*, v. 15, p. 82-91.
- Enfield, D.B., 1989, El Niño, Past and Present: *Reviews of Geophysics*, v. 27, p. 159-187.
- Mitchell, J.F.B., Senior, C.A. and Ingram, W.J., 1989, CO₂ and climate: a missing feedback?: *Nature*, v. 341, p. 132-134.
- Newell, R.E., 1974, Changes in the poleward energy flux by the atmosphere and ocean as a possible cause for ice ages: *Quaternary Research*, v. 4, p. 117-127.
- Pond, S. and Pickard, G.L., 1983, *Introductory Dynamical Oceanography*: Pergamon Press, London, 329 p.
- Stouffer, R.J., Manabe, S. and Bryan, K., 1989, Interhemispheric asymmetry in climate response to a gradual increase of atmospheric CO₂: *Nature*, v. 342, p. 660-662.
- Washington, W.M. and Meehl, G.A., 1989, Climate sensitivity due to increased CO₂: experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model: *Climate Dynamics*, v. 4, p. 1-38.
- Washington, W.M. and Parkinson, C.L. 1986, *An introduction to three-dimensional climate modeling*: Oxford University Press, London, 422 p.