

11. La modélisation numérique de l'océan

Julie Deshayes et Olivier Aumont

La modélisation numérique de l'océan consiste à simuler ses caractéristiques observables à partir d'hypothèses physiques, biologiques et chimiques sur les relations entre ces variables. Ces caractéristiques peuvent décrire les masses d'eau et leurs mouvements (température, salinité, courants marins...), la glace de mer (extension, épaisseur, âge...) ou les propriétés biogéochimiques (quantité de carbone organique et inorganique dissous, pH...) de l'océan. Les observations de ces caractéristiques (par satellite, cf. III.3, ou par mesures *in situ*, cf. III.2) sont indispensables pour produire, valider et interpréter les simulations produites par la modélisation. En retour, ces simulations sont utiles pour reconstruire le contexte spatio-temporel d'observations ponctuelles, ainsi que pour analyser le rôle joué par les différents processus en jeu. Au-delà, la modélisation numérique de l'océan, en raison du rôle clé joué par l'océan dans le système climatique

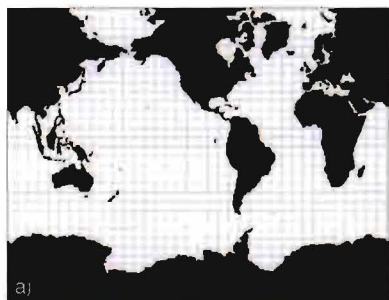
(cf. I.3) est un élément essentiel pour la reconstruction du climat passé, pour la compréhension du climat actuel, et pour les projections du climat futur.

Histoire de la modélisation

Au commencement de l'océanographie, les physiciens des fluides géophysiques* ont tenté de théoriser les caractéristiques et les mouvements des masses d'eau à partir des principes fondamentaux de la mécanique et de la thermodynamique. Ces efforts, menés depuis le début du XX^e siècle, en parallèle à l'amélioration et à la multiplication des observations océaniques, ont consisté à établir, puis à résoudre, les équations fondamentales de l'océanographie physique. La résolution analytique de ces équations (à

la main) était alors en accord avec le nombre très limité d'observations de l'océan. Mais la multiplication des observations et les échecs de la théorie à les reproduire, ont révélé l'importance de phénomènes complexes (processus non linéaires, prise en compte du relief du fond des océans, stratification* en profondeur), qui rendent le système d'équation trop complexe pour être résolu avec un papier et un crayon. La résolution numérique des équations permettait, de surcroît, de répondre au souci naissant de prévoir le climat futur. C'est ainsi qu'a débuté la modélisation numérique de l'océan, vers la fin des années 1970.

La biogéochimie marine est très étroitement liée à la dynamique des océans. Aussi le développement des premiers modèles numériques a-t-il permis l'émergence de la modélisation numérique du cycle du carbone océanique à la fin des années 1980. Auparavant, il n'exis-



a) Maillage* horizontal de la configuration NEMO* eORCA1 (océan global de résolution 1°×1°). Chaque carré gris contient 100 cellules du modèle. b) Exemple de code Fortran 90 du modèle NEMO. c) Mésocentre ESPRI IPSL à Polytechnique. © École Polytechnique / J. BARANDE. ■

trait que des modèles théoriques du phytoplancton* et des interactions phytoplancton-zooplancton*.

Lors de la décennie 1990, une dizaine de modèles océaniques globaux ont été développés : ils permettraient de simuler la circulation générale des océans et, pour certains d'entre eux, de simuler également le cycle du carbone océanique. Ces modèles ont été distribués de manière libre au sein de communautés d'utilisateurs, ce qui a permis de multiplier leur usage, ainsi que de réaliser des exercices d'intercomparaison de ces différents modèles. Puis, dans les années 2000, est apparue une vision totalement intégrée du système climatique, qui s'est traduite par l'apparition des premiers modèles du système Terre, dont l'océan « bleu-blanc-vert » (dynamique, glace de mer et biogéochimie marine) est une composante majeure. Ces modèles sont actuellement utilisés pour réaliser les exercices de projection du climat futur qui alimentent les rapports du GIEC.

Principes de la modélisation

La construction de modèles océaniques repose sur trois grandes étapes principales. Tout d'abord, le système à représenter doit être défini. Il peut s'agir de l'océan global, d'une région, ou d'une structure particulière, comme un tourbillon. Lors de cette étape, le formalisme théorique (mathématique) est choisi. Pour la dynamique océanique, les chercheurs utilisent les équations de la dynamique des fluides géophysiques. Pour la biogéochimie marine, la modélisation repose sur des équations physiques pour décrire le transport des espèces chimiques et du plancton et sur des formulations

empiriques pour représenter les processus biologiques. La deuxième étape correspond à la discrétisation, spatiale et temporelle, des systèmes d'équations choisis. Ceci nécessite de définir un maillage* du domaine représenté, qui impose de faire certains choix, tels que la résolution spatiale et la géométrie des cellules. Les processus impossibles à représenter explicitement, soit parce qu'ils sont caractérisés par une échelle spatiale et temporelle plus fine que la résolution choisie, soit parce qu'ils sont trop complexes pour être décrits précisément, doivent être paramétrisés par des relations souvent empiriques. Enfin, les conditions aux limites doivent être prescrites. Il s'agit, par exemple, des conditions océaniques aux frontières du domaine et des interactions avec l'atmosphère. La troisième et dernière étape correspond à la traduction du modèle en code informatique et à son exécution sur des ordinateurs. Lors de cette étape se posent des questions de performance, de reproductibilité et d'archivage des résultats. Les modèles océaniques étant souvent très coûteux en terme de calcul informatique, les simulations sont principalement réalisées sur des supercalculateurs massivement parallèles, regroupant des milliers de processeurs et localisés dans des centres de calculs dédiés, régionaux ou nationaux (figure).

En tenant compte de tous les choix possibles à chaque étape de la création d'un modèle océanique, il y en aurait, en théorie, une infinité. En pratique, la communauté internationale des océanographes mutualise ses

efforts de développement et, à l'heure actuelle, une vingtaine de modèles d'océan dynamique, de glace de mer et/ou de biogéochimie marine sont utilisés. Ces modèles sont développés par des chercheurs et des ingénieurs pour répondre à une ou plusieurs applications : la recherche académique sur les processus océaniques, les projections climatiques ou l'océanographie opérationnelle (cf. III.12). La comparaison des simulations produites par ces modèles aux observations correspondantes nécessite de prendre en compte l'incertitude sur les observations comme sur les modèles. En effet, bien que les modèles soient principalement basés sur des équations déterministes, les variables simulées contiennent une part non négligeable de signal aléatoire (d'autant plus importante que la résolution spatiale du maillage est fine). La part aléatoire des simulations peut être évaluée et éliminée par la production d'ensemble de simulations très proches les unes des autres, analogues aux ensembles de simulations produits pour la prévision météorologique, mais cela nécessite de très grandes ressources en calcul informatique.

En conclusion, il n'existe pas de modèle universel de l'océan bleu-blanc-vert qui réponde à tous les besoins des utilisateurs, scientifiques ou non. La modélisation numérique de l'océan est une discipline de l'océanographie, qui est en interaction forte avec un grand nombre d'autres disciplines scientifiques : océanographie observationnelle, biologie marine, mathématiques appliquées, informatique...

Références bibliographiques

- O. BOUCHER *et al.* – *Projection des changements climatiques futurs*, La Météorologie, 2015.
- C. JEANDEL et R. MOSSERI (dir.) – *Le climat à découvrir*, CNRS Éditions, 2011.
- S. MASSON *et al.* – *Les modèles climatiques gagnent en précision*, La Recherche, L'actualité des sciences, 2012.

Deshayes J., Aumont Olivier (2017)

La modélisation numérique de l'océan

In : Euzen A. (dir.), Gaill F. (dir.), Lacroix D. (dir.), Cury
Philippe (dir.). *L'océan à découvert*

Paris : CNRS, p. 124-125. (A Découvert)

ISBN 978-2-271-11652-9