



## Modéliser les océans du globe

Sebastian Minjeaud, Maëlle Nodet, Antoine Rousseau

► **To cite this version:**

Sebastian Minjeaud, Maëlle Nodet, Antoine Rousseau. Modéliser les océans du globe. Maths de la planète Terre Express, Comité International des Jeux MATHématiques, 2013, pp.88-90. <hal-00915567v2>

**HAL Id: hal-00915567**

**<https://hal.inria.fr/hal-00915567v2>**

Submitted on 17 Feb 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ce projet est réalisé à l'initiative de l'*Institut des Sciences Mathématiques* et de leurs interactions du *CNRS*, d'*INRIA*, de la *Société Française de Statistique*, de la *Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles* et de la *Société Mathématique de France*, avec le soutien de *Cap' Maths* dans le cadre des Investissements d'avenir.

## **Modéliser les océans du globe**

*Le texte suivant est tiré d'une brève publiée sur le site Un jour, une brève. Il a été rédigé par Sebastian Minjeaud (CNRS), Maëlle Nodet (Université de Grenoble), et Antoine Rousseau (Inria).*

Il existe, sous la surface de nos océans, un immense réseau de courants marins, véritables tapis roulants des mers, qui transportent des masses d'eau absolument gigantesques. Ces courants à grande échelle, parmi lesquels figure le célèbre Gulf Stream, jouent un rôle primordial dans la dynamique des océans, et bien entendu dans l'équilibre thermodynamique de notre planète. Il est donc essentiel de pouvoir les comprendre afin d'anticiper d'éventuels déséquilibres qui pourraient advenir, par exemple, dans le cadre du réchauffement climatique.

### *Un processus physique élémentaire*

Les processus physiques à l'origine de la complexité des courants marins sont nombreux : gravité, influence des vents, rotation de la Terre, attraction de la Lune, effets de bord, topographie des fonds marins, etc.

Néanmoins les mouvements des grandes masses d'eau à l'échelle de la planète s'expliquent par un processus élémentaire : sous l'effet de la gravité, des fluides de masses volumiques différentes se mettent spontanément en mouvement jusqu'à atteindre leur position d'équilibre, le plus lourd en dessous, le plus léger au dessus. Ce processus peut être illustré par une expérience reproductible par tous<sup>2</sup> (voir Figure 1) : deux bouteilles identiques remplies d'eau sont reliées par des pailles et pour les distinguer, l'eau contenue initialement dans la première bouteille est colorée en vert, celle de la seconde en rouge. Rien ne se passe si la température des deux liquides est identique, mais un mouvement s'amorce dès lors que les températures initiales diffèrent : par exemple, sur la Figure 1 il ne se passe rien si la température des deux liquides est identique, mais un mouvement s'amorce dès lors que les températures initiales ne sont pas identiques dans les deux bouteilles : l'eau rouge plus chaude et donc moins dense passe au-dessus de l'eau verte plus froide et donc plus lourde.

### *Un modèle mathématique simplifié*

Bien que facile à réaliser, cette expérience est délicate à modéliser mathématiquement et à reproduire numériquement. L'évolution dans le temps des fluides visqueux (comme l'eau ou l'air) est décrite par le

Figure 1  
Expérience des deux bouteilles :  
l'eau rouge, plus légère que l'eau verte,  
passe au-dessus.

© Inria



modèle de Navier-Stokes : ce système d'équations repose sur les principes généraux de conservation de la dynamique des fluides (conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie). Pour que ces équations aient une chance d'admettre une solution unique (il faut noter que malgré tous les efforts des mathématiciens, il n'existe toujours pas de démonstration de l'existence de solutions aux équations de Navier-Stokes dans un cadre général !), il faut ajouter à ce système une loi d'état qui précise, par exemple, le lien entre la masse volumique et la température d'un fluide. Ainsi, le modèle mathématique est très complexe et il est impossible d'en trouver une solution exacte explicite.

Figure 2  
Simulation numérique  
de l'expérience des deux bouteilles :  
elle permet de reproduire  
l'expérience

© S. Minjeaud



Il est par contre possible de le remplacer par un problème ne faisant intervenir qu'un nombre fini d'inconnues qui décrivent de manière approchée mais fidèle la solution physique du problème. Ce problème *discret* peut alors être résolu à l'aide d'un algorithme adapté et mis en place sur un ou plusieurs ordinateurs. On obtient ainsi une réalisation virtuelle, Figure 2, d'un processus bien réel.

### *Vers des modèles océaniques réalistes*

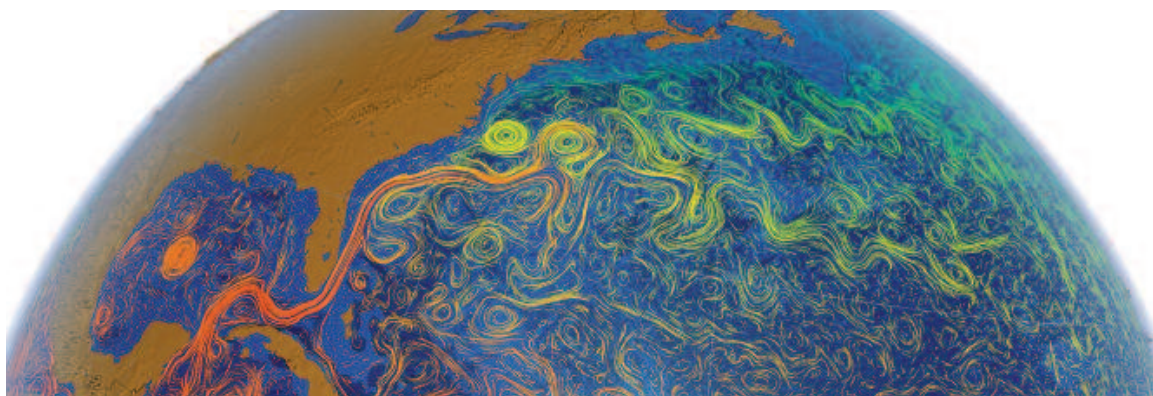
Le rôle essentiel de la masse volumique de l'eau comme moteur principal de la circulation océanique à grande échelle a été mis en évidence dans des bacs de laboratoire par un océanographe suédois, J. W. Sandström, en 1908. La masse volumique des eaux des océans varie pour deux raisons essentielles :

- les variations de température : plus la température augmente, plus la

masse volumique diminue.

- **les variations du degré de salinité** : plus l'eau de mer est chargée en sel, plus elle est dense. On peut s'en convaincre en prenant un litre d'eau dans une casserole, et en y ajoutant du sel. Le volume ne change pas mais la masse de l'eau salée est la somme de celle de l'eau et du sel ajouté (on peut dissoudre plus de 300 grammes de sel par litre à 25°C !). Par conséquent, la masse volumique augmente au fur et à mesure que l'on ajoute du sel.

Bien entendu, dans les océans du globe, les phénomènes sont plus complexes que dans les deux bouteilles de notre expérience. Chaque processus élémentaire, après avoir été validé grâce à des expériences ou des données, doit être intégré à un modèle global, très complexe, qui intègre l'ensemble de ces briques élémentaires. Ainsi, des scientifiques de la NASA, grâce à un modèle développé au Massachusetts Institute of Technology (MIT), ont récemment produit des images spectaculaires des grands courants marins de notre planète. On peut ainsi voir ci-dessous une *carte numérique* des courants qui parcourent l'océan Atlantique Nord, comprenant le célèbre Gulf Stream. Ces images, bien que splendides et relativement réalistes, sont pourtant encore imparfaites. Il faudrait ajouter encore bien d'autres processus physiques ou même chimiques pour simuler précisément les courants de notre planète. Pour cela, on aura encore besoin de bien des mathématicien(ne)s pour aider à concevoir et étudier les futurs modèles...



Simulation numérique des courants marins dans l'Atlantique Nord.  
La couleur illustre la température à la surface de l'océan.  
© nasa/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio.

**S.M., M.N. et A.R.**

**Pour en savoir plus :**

- 1 <http://www.mpt2013.fr>
- 2 <http://videotheque.inria.fr/videotheque/doc/792>