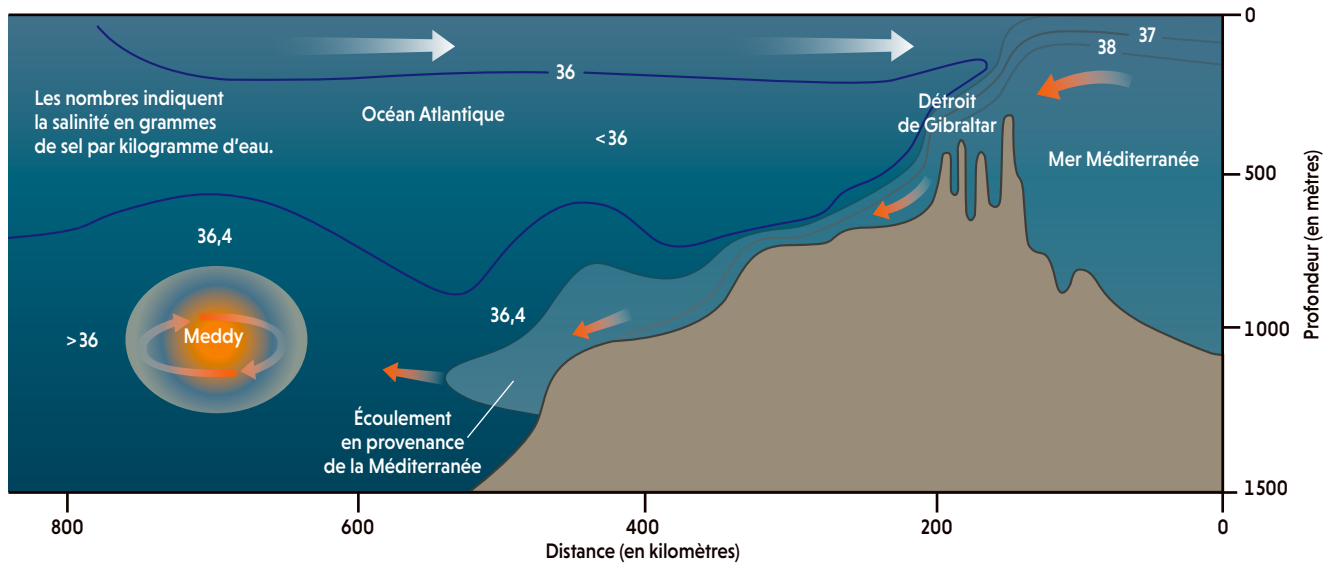




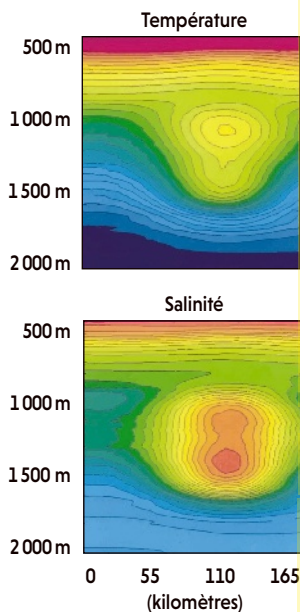
LES MEDDIES DE L'ATLANTIQUE

De façon surprenante, des tourbillons flottants se forment aussi dans les océans terrestres. Les plus connus sont les *meddies*. L'eau chaude et salée de la mer Méditerranée s'écoule dans l'océan Atlantique par le détroit de Gibraltar. Elle s'enfonce jusqu'à atteindre une densité équivalente vers 1000 mètres de profondeur. Ce courant, soumis à la force de Coriolis due à la rotation de la Terre, peut alors former des tourbillons qui se déplacent horizontalement et vers l'ouest. Ils mesurent environ 600 mètres de hauteur pour près de 100 kilomètres de diamètre et forment donc des lentilles d'eau très aplaties.

planète, mais il faut rester prudent quant à la transposition de ces données à la situation réelle. Les prochaines étapes de notre étude consisteront à raffiner ce modèle en incorporant davantage d'ingrédients physiques, de façon contrôlée afin de bien comprendre l'action de chaque paramètre.

Par exemple, une différence importante entre un liquide et un gaz est la compressibilité : il est très difficile de réduire le volume d'un liquide, tandis qu'il est possible de comprimer un gaz à la main, comme dans une pompe à vélo. Ces effets de compressibilité sont importants pour la dynamique de l'atmosphère gazeuse de Jupiter, et il serait possible de les quantifier numériquement. Dans le cas de la Grande Tache rouge, ces effets déformeraient sans doute le tourbillon dans sa direction verticale avec une asymétrie de part et d'autre du plan équatorial : sa « racine » serait moins profonde dans les zones denses en dessous et sa « tête » serait plus haute dans les zones peu denses.

Il est aussi crucial de discuter les limites de notre modèle et de le comparer aux théories existantes et à des simulations numériques plus détaillées de la dynamique jovienne, qui ont l'avantage d'être plus complètes, mais dont les temps de calcul se comptent en mois (et dépassent parfois un an) sur des supercalculateurs et où il est plus difficile de séparer les différents phénomènes les uns des autres. Par exemple, en 2015,



Les *meddies* sont identifiables lors de sondages verticaux dans la colonne d'eau. Ils forment des poches d'eau anormalement chaude (en haut) et salée (en bas).

Moritz Heimpel, de l'université de l'Alberta, au Canada, et ses collègues ont simulé pour la première fois l'intérieur liquide de Jupiter et son atmosphère, reproduisant simultanément des jets zonaux profonds et des tourbillons superficiels. Toutes ces approches sont complémentaires et s'enrichissent mutuellement. La convergence des résultats permettra de percer le secret de la Grande Tache rouge de Jupiter.

Les tourbillons flottants dont nous avons discuté jusqu'à présent sont liés à l'environnement de Jupiter. Ils ont un parfum d'exotisme et de monde lointain aux conditions extrêmes. Pourtant, les ingrédients qui contribuent à la formation et à la stabilité des tourbillons joviens sont présents dans de nombreux systèmes géophysiques et astrophysiques. Du fait de l'aspect universel des mécanismes en dynamique des fluides (voir l'encadré page 32), on s'attend à observer des structures tourbillonnaires flottantes ailleurs que sur Jupiter.

DES TOURBILLONS FLOTTANTS DANS LES OCÉANS

Et c'est effectivement le cas, par exemple dans les océans terrestres ! Les océans sont soumis à la rotation de la Terre et sont globalement stratifiés en raison des variations de salinité et de température. Alors que l'hypothèse des tourbillons flottants reste à confirmer pour les vortex joviens, l'existence de tourbillons flottants dans les océans terrestres ne fait aucun doute. Les plus connus sont les *meddies* de l'océan Atlantique (*meddy* est la contraction de l'anglais *Mediterranean eddy*, « tourbillon méditerranéen »).

Il s'agit de grands anticyclones constitués d'eau chaude et salée, d'un diamètre compris entre 40 et 100 kilomètres pour une épaisseur de 600 à 1000 mètres, flottant à une profondeur d'environ 1000 mètres sous la surface de ➤

QUAND JUPITER EST CONSTITUÉE DE MIEL!

Les équations de Navier-Stokes décrivent le mouvement de fluides dont les propriétés peuvent être très diverses. Elles s'appliquent à des fluides visqueux ou non, à un liquide tel que l'eau ou à un gaz tel que l'air, qui sont pourtant bien différents. Par exemple, l'air est compressible, c'est-à-dire qu'on peut réduire un volume donné en le comprimant, augmentant ainsi sa densité, ce qui n'est quasiment pas le cas pour l'eau. Même certains fluides aux comportements exotiques n'échappent pas à ces équations (c'est le cas des fluides « non newtoniens » comme le sang ou l'eau additionnée de fécule de maïs).

Le caractère universel des équations de Navier-Stokes a des conséquences étonnantes. En particulier, elles sont valables à l'échelle d'une tasse de café comme à l'échelle d'une tempête dans l'atmosphère de Jupiter. Cette universalité permet de reproduire en laboratoire certains phénomènes physiques observés dans les fluides naturels en changeant leur taille, voire en modifiant la nature du fluide : sous réserve que l'on respecte l'amplitude relative des différentes forces mises en jeu, la dynamique sera la même.

Prenons l'exemple de la convection dans le manteau terrestre. Ces mouvements sont responsables de la tectonique des plaques et agissent à des échelles de l'ordre du millier de kilomètres et à des vitesses de l'ordre du centimètre par an. Ils sont engendrés par les différences de densité entre la roche très chaude à la base et celle plus froide, et donc plus dense, au sommet du manteau. Cette dynamique convective est dominée par les effets de viscosité. Il est possible de la reproduire de façon simplifiée dans une maquette haute de 15 centimètres en chauffant par le bas un fluide visqueux (solution de cellulose par exemple) pour établir un contraste de température de l'ordre de quelques dizaines de degrés. On respecte alors le rapport entre les forces de flottabilité (la solution chauffée tend à s'élever car elle est moins dense) et les forces visqueuses qui s'opposent à cette élévation, tel qu'on l'estime dans le manteau. On reproduit ainsi un phénomène de très grande envergure dans une maquette réduite.

À l'inverse, il est possible de reproduire à taille humaine des phénomènes ayant lieu

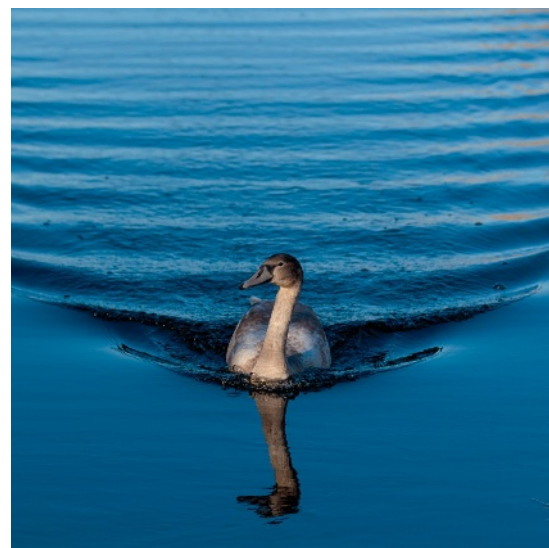


à toute petite échelle. Par exemple, les flagelles qui assurent la propulsion de certaines bactéries mesurent quelques micromètres de longueur et peuvent osciller plusieurs dizaines de fois par seconde. En laboratoire, on les modélise avec des hélices centimétriques, qui tournent dans un bain de glycérine à une vitesse de l'ordre d'un tour toutes les dix secondes. Cette fois-ci, la mécanique

On respecte la similitude pour imiter le phénomène à une autre échelle

des fluides observée y est la même car on respecte le rapport entre les forces d'inertie et la viscosité : si on augmente la taille du flagelle, il est nécessaire de réduire sa vitesse de rotation.

Dans ces deux exemples, hormis la simplification drastique du système, il est possible d'atteindre le régime naturel (planétaire ou biologique) grâce à cette notion de similitude. Malheureusement, il n'est pas toujours possible d'obtenir une similitude exacte. C'est le cas par exemple des phénomènes de



Les îles Sandwich, dans l'Atlantique, provoquent un sillage dans l'atmosphère, souligné par la forme des nuages. Le cygne trace la même figure sur l'eau. C'est une manifestation du principe de similitude.

grande envergure et très peu visqueux (dominés par l'inertie). Modéliser en laboratoire l'écoulement de l'air autour d'une aile d'avion à vitesse de croisière (environ 800 kilomètres par heure) est très difficile, puisqu'en réduisant la taille de l'aile, nous donnons artificiellement plus de poids aux effets visqueux, et il faudrait en théorie augmenter la vitesse d'un même facteur!

Dans l'étude expérimentale des vortex joviens, on se heurte à un problème similaire. Il est possible de compenser la réduction de la taille du vortex par une augmentation du taux de rotation (un jour jovien correspond à un peu moins de dix heures, notre expérience réalise un tour en seulement douze secondes). Hélas, cette augmentation du taux de rotation n'est pas suffisante pour reproduire rigoureusement l'équilibre de forces présent dans l'atmosphère de Jupiter: il faudrait pour cela que notre cuve tourne beaucoup, mais alors, beaucoup plus vite! Cet inévitable écart entre l'expérience de laboratoire et la réalité peut s'interpréter comme une modification de la viscosité du fluide, comme si Jupiter était constituée de miel, beaucoup plus visqueux que les gaz constituant l'atmosphère jovienne. L'écoulement que nous étudions est donc beaucoup plus calme que la réalité, même s'il partage *a priori* les mêmes propriétés à grande échelle.

Lorsqu'il est impossible de respecter tous les équilibres de force, l'objectif est alors de faire des compromis en se concentrant sur les équilibres les plus importants, puis en faisant varier les autres paramètres afin de sonder la réponse du système. On peut ensuite extrapoler les résultats expérimentaux aux systèmes réels, en les comparant aux observations.

D. L., B. F. et M. L. B.