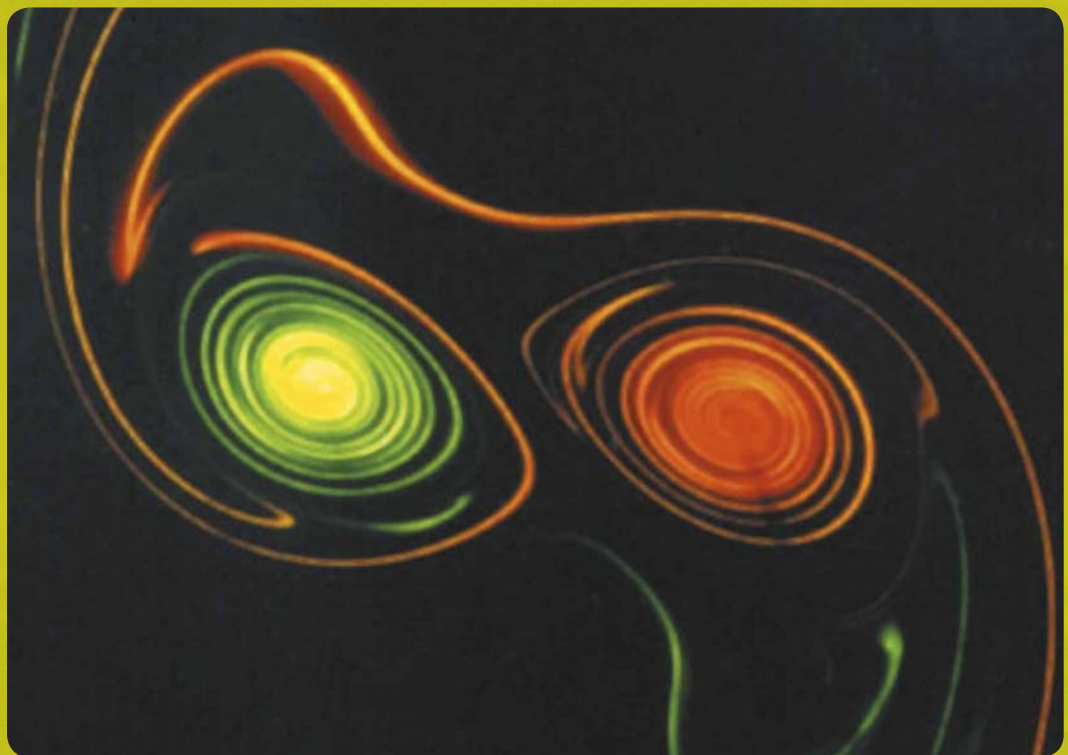




FRÉDÉRIC MOISY, CYRIL LAMRIBEN, PIERRE-PHILIPPE CORTET, MARC RABAUD

Laboratoire Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques  
(FAST) (UMR 7608, UPS/CNRS/UPMC)  
UFR Sciences

# Et pourtant, elle tourne...



© CNRS PHOTOTHÈQUE / LEWEKE THOMAS

Quel est le point commun entre la circulation océanique globale, la tâche rouge de Jupiter ou un anticyclone atmosphérique, le panache d'eau douce créé par un fleuve à son embouchure...? Tous ces phénomènes naturels sont des écoulements géophysiques. Comprendre leur dynamique complexe est un formidable défi pour les scientifiques.

Photo : Fusion de deux tourbillons, ou vortex. Ce type d'écoulement est présent dans des couches de mélanges par exemple, ou des écoulements géophysiques.

La dynamique des écoulements géophysiques, comme ceux de l'atmosphère et de l'océan, joue un rôle majeur en météorologie, ainsi que dans l'évolution du climat à long terme. Une nouvelle plateforme expérimentale polyvalente, baptisée Gyroflow, a été mise en place à la Faculté des Sciences d'Orsay au Laboratoire FAST (Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques) pour la « simulation » de ces écoulements géophysiques. Les toutes premières expériences réalisées sur cette plateforme, portant sur la propagation d'ondes d'inertie et sur la turbulence en rotation, sont présentées dans cet article.

## La dynamique des écoulements géophysiques

La climatologie, la météorologie et l'océanographie s'attachent à décrire la dynamique des écoulements de fluides à grande échelle, qu'il s'agisse de l'atmosphère ou des océans (figure 1). D'une manière générale, ces écoulements, dits *géophysiques*, sont soumis aux effets de la rotation de la Terre, de la stratification (variation de la masse volumique avec l'altitude ou la profondeur), ainsi que de la topographie (reliefs terrestres ou sous-marins). Les écoulements géophysiques sont très fortement turbulents et imprédictibles, comme l'illustrent les caprices de la météo et les difficultés que l'on a à prévoir le temps qu'il fera au-delà de quelques jours. Toutefois, en dépit de variations extrêmes, et parfois dramatiques, il existe une certaine forme de régularité dans ces fluctuations. En témoignent certains phénomènes saisonniers, tels que la mousson ou la succession de cyclones l'été dans l'Atlantique, ou plus espacés dans le temps, comme les épisodes « El Niño », qui demeurent mal compris aujourd'hui.

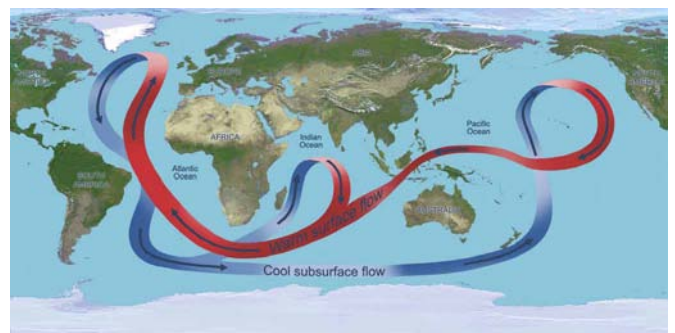
Même si l'étude des écoulements géophysiques est souvent restreinte à l'océan ou à l'atmosphère terrestre, elle reste évidemment pertinente pour d'autres systèmes, comme les planètes géantes gazeuses. La célèbre tache rouge de Jupiter, par exemple, n'est finalement qu'un épisode de tempête anticyclonique, certes attesté depuis le XVII<sup>e</sup> siècle, mais certainement pas éternel ! Le noyau liquide des planètes telluriques, comme la Terre, est également le siège de tels écoulements géophysiques. Ainsi, on sait aujourd'hui que l'existence du champ magnétique terrestre, et ses retournements irréguliers à l'échelle des temps géologiques, résultent d'instabilités magnéto-hydrodynamiques prenant place dans le noyau conducteur en rotation. Enfin, ce couplage entre rotation, stratification et champ magnétique est présent dans tous les fluides astrophysiques, des étoiles en rotation aux disques d'accrétion à l'origine de la formation des étoiles et des planètes.

FIGURE 1

Quelques exemples d'écoulements géophysiques. (a), deux cyclones au sud de l'Islande. (b), circulation océanique moyenne, induite par les effets couplés des variations de température, de salinité, et de la rotation terrestre. (c), tache rouge de Jupiter (tempête anticyclonique), photographiée par Voyager 1.



(a)



(b)



(c)

© A. B. ETC. - NASA

## Une nouvelle plateforme tournante

On l'aura compris, vu la diversité des situations où interviennent les écoulements géophysiques, prédire et modéliser leur dynamique est essentiel. La difficulté de ce champ d'étude réside notamment dans la grande disparité des échelles de temps et d'espace en jeu. Les aspects turbulents à petite échelle, par exemple les rafales de vents, évoluent au sein d'écoulements à grande échelle plus lents, tels que les cycles diurnes et annuels, qui sont eux fortement affectés par la stratification et la rotation planétaire. Le transport et le mélange de polluants, ou encore la dispersion des composants biochimiques dans l'océan, sont le fruit de cette dynamique turbulente multiéchelle. La simulation numérique de tels écoulements constitue un véritable défi, en raison

de tailles de simulations et de temps d'intégration considérables qui sont nécessaires pour reproduire ces comportements spatio-temporels complexes. Malgré la croissance exponentielle des ressources de calculs, les expériences de laboratoire visant à simuler ces écoulements géophysiques restent, aujourd'hui encore, incontournables.

C'est dans ce contexte qu'une nouvelle plateforme expérimentale, baptisée «Gyroflow» (figure 2), vient d'être mise en place à la Faculté des Sciences d'Orsay, au Laboratoire FAST (Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques). Cette plateforme tournante polyvalente permet d'embarquer jusqu'à une tonne d'expériences en rotation, avec toute l'instrumentation associée, à une vitesse angulaire pouvant atteindre 30 tours/minute. Sa très grande stabilité mécanique en fait un instrument de choix pour l'étude des écoulements d'intérêt géophysique. Ce nouvel outil

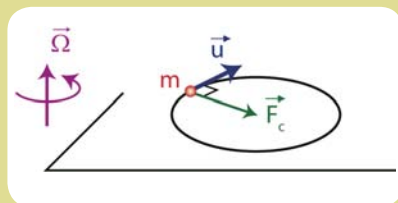
### 1 Force centrifuge et force de Coriolis

Le Principe Fondamental de la Dynamique, qui stipule qu'une masse  $m$  subit une accélération donnée par  $\Sigma \vec{F}/m$  (avec  $\Sigma \vec{F}$  la somme des forces qui s'exercent sur elle), ne s'applique que dans un référentiel dit *Galiléen*. Un référentiel Galiléen est un référentiel supposé «immobile», ou en déplacement rectiligne uniforme par rapport à un tel référentiel supposé «immobile» (ce concept de référentiel «immobile» ne peut être qu'approximatif par essence, et dépend du système considéré, et en particulier du temps sur lequel il est considéré).

Dans un référentiel *non Galiléen*, par exemple un référentiel en rotation, il faut «tricher» pour que le Principe Fondamental de la Dynamique reste valable: on doit y ajouter, en plus des forces «réelles» de la physique, des «forces effectives» (ou encore «pseudo-forces»). Il s'agit des **forces d'inertie**, qui n'existent que *via* l'effet qu'elles produisent sur l'équilibre ou le mouvement des masses. Dans le cas d'une rotation à vitesse constante, ces forces d'inertie sont au nombre de 2: la *force centrifuge*, ressentie pour toute particule au repos ou en mouvement relatif, et la *force de Coriolis*,

ressentie par les particules en mouvement relatif seulement.

La force centrifuge est la plus intuitive: c'est celle qui nous déporte vers l'extérieur dans un virage, ou bien lorsque nous nous tenons debout et *immobile* sur un manège. La force centrifuge est responsable de la forme courbée (paraboloïdale) que prend la surface d'un liquide en rotation.



La force de Coriolis est celle que l'on ressent lorsque l'on se *déplace* cette fois-ci sur le manège (elle s'ajoute alors à la force centrifuge). Si la vitesse angulaire du manège est constante, de vecteur instantané de rotation  $\vec{\Omega}$  (vecteur porté par l'axe de rotation et de norme donnée par la vitesse angulaire), cette force est donnée par  $\vec{F}_c = -2m\vec{\Omega} \times \vec{u}$ , où  $\vec{u}$  est la vitesse relative de la particule dans le référentiel tournant. La présence du produit vectoriel  $\times$  indique que la force de

Coriolis est perpendiculaire à la fois à  $\vec{\Omega}$  et à  $\vec{u}$ . Cette force va donc dévier la trajectoire de la masse dans le plan de rotation. En l'absence d'autres forces, il en résulte une orbite circulaire, à la pulsation propre  $\omega = 2\Omega$ . Cet effet est analogue à celui subi par une particule chargée dans un champ magnétique, soumise à la force de Lorentz  $\vec{F}_L = -q\vec{B} \times \vec{u}$ , et orbitant à la pulsation propre  $\omega = B/m$ .

Pour les fluides en référentiel tournant, comme l'atmosphère ou l'océan, la force centrifuge est compensée par une variation de pression opposée, et ne joue donc pas de rôle dans la dynamique. En revanche, pour des mouvements de fluide lents, dont la durée est de l'ordre de la journée ou plus, l'effet de la rotation de la Terre ne peut plus être négligé, et la force de Coriolis doit être prise en compte. Pour des mouvements «horizontaux» (relativement à la surface locale de la Terre), la force de Coriolis est maximale aux pôles (c'est la situation analogue à un manège), et nulle à l'équateur. Elle induit une déflexion sur la droite de la trajectoire dans l'hémisphère Nord, et sur la gauche dans l'hémisphère Sud.

nous permet aujourd'hui de nous lancer dans un programme de recherche prometteur, qui abordera l'étude de l'influence de la rotation du référentiel sur des problèmes d'instabilités hydrodynamiques, de convection thermique, de turbulence etc.

En mécanique des fluides, pour qu'une simulation à petite échelle d'un écoulement soit pertinente vis-à-vis des phénomènes à étudier, il faut veiller à respecter le « principe de similitude » : les rapports entre les forces mises en jeu, que l'on décrit usuellement par des nombres sans dimension (nombre de Reynolds, nombre de Rossby, etc.), doivent être identiques entre l'écoulement réel et celui qui le reproduit. Par exemple, si notre plateforme tourne 40 000 fois plus vite que la terre, mais que les temps de vie des structures observées (cyclones, anticyclones...) sont eux aussi 40 000 fois plus court, alors notre simulation est pertinente. Dans notre cas, certaines de ces similitudes sont respectées, comme celle exprimant les rapports des temps caractéristiques, mais d'autres ne peuvent pas l'être : l'effet de la dissipation par friction visqueuse, par exemple, sera toujours plus important dans une expérience de laboratoire que dans un écoulement géophysique réel. Malgré tout, si les phénomènes étudiés ne dépendent pas trop des effets de la dissipation, nos expériences garderont un degré de réalisme très intéressant.

Les expériences en référentiel tournant sont toujours confrontées au problème des systèmes de mesure, qui doivent être embarqués sur la plateforme. Cela nécessite le passage des liaisons informatiques haut débit dans le référentiel tournant, et un niveau de vibrations résiduelles extrêmement faible. Dans nos expériences, nous mettons en œuvre des mesures de Vélocimétrie par Images de Particules (PIV) : cette méthode non intrusive consiste à filmer des petites particules de quelques microns de diamètre, en suspension dans l'eau, et éclairées par une fine nappe à l'aide d'un laser pulsé. Par corrélation d'images successives, il est possible de reconstruire le champ de vitesse de l'écoulement en tout point du plan illuminé. Si l'on dispose de deux caméras, en utilisant le principe de la vision stéréoscopique, il est même possible d'accéder aux trois composantes de la vitesse en chaque point du plan de mesure. L'avènement des caméras rapides et de haute résolution spatiale permet aujourd'hui d'appliquer cette méthode aux écoulements turbulents, qui présentent des fluctuations rapides à petite échelle. En contrepartie, cette méthode génère des volumes d'information conséquents, nécessitant des puissances de calcul de plus en plus élevées.

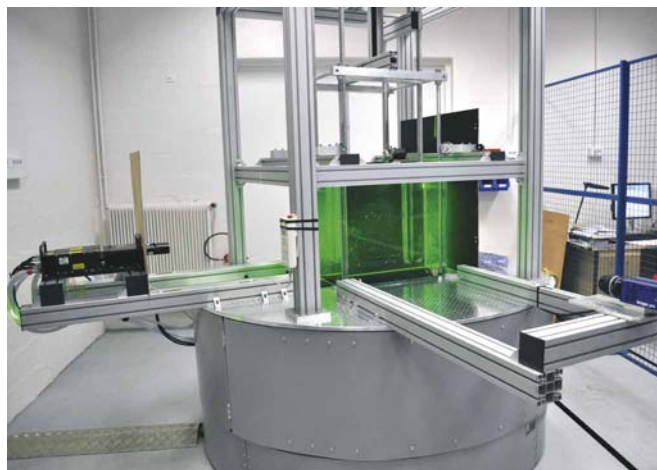
Un premier aspect clef des écoulements géophysiques est leur tendance à être bidimensionnel, qui découle de l'influence combinée de la stratification, de la rotation de la Terre et de la faible épaisseur des couches fluides considérées. Dans le cas de la stratification seule, par exemple induite par la varia-

tion de la salinité avec la profondeur, cette tendance à la bidimensionalité se comprend facilement. Un élément de fluide de concentration en sel donnée, et donc de masse volumique donnée, aura tendance à rester à une profondeur fixée : en effet, s'il descend par exemple, la poussée d'Archimède due au fluide environnant plus salé aura tendance à le « porter » et à le faire remonter - et vice versa. Ainsi, les mouvements autorisés par la stratification auront tendance à être essentiellement horizontaux, et des couches de fluide de densité à peu près homogène « glisseront » les unes sur les autres (**figure 3**).

Si l'on considère maintenant l'effet de la rotation seule, cette tendance à la bidimensionalité existe aussi, mais elle est plus subtile et de nature assez différente. Son origine se trouve dans la force de Coriolis\* (**encadré 1**) qui, pour des mouvements horizontaux, va défléchir la trajectoire du fluide, sur la droite pour une rotation anti-horaire du référentiel (cas de l'hémisphère Nord), et inversement pour une rotation horaire. Cette déflexion n'est perceptible que pour des mouvements suffisamment lents, c'est-à-dire évoluant en un temps comparable à la période

## FIGURE 2

La plateforme tournante « Gyroflow ». Installée au laboratoire FAST en septembre 2009, cette plateforme, d'un diamètre de 2 mètres, permet d'embarquer jusqu'à 1 tonne d'expériences de mécanique des fluides en référentiel tournant, à une vitesse angulaire pouvant aller jusqu'à 30 tours / minute. L'écoulement présenté ici est contenu dans une cuve en verre de 200 litres, au centre de la plateforme. Le champ de vitesse dans un plan vertical est mesuré au moyen d'un dispositif de Vélocimétrie par Images de Particules (PIV), embarqué dans le référentiel en rotation. Ce dispositif comprend un laser pulsé (sur la poutre de gauche), venant éclairer des petites billes de verre de 10 microns en suspension dans l'eau, et une caméra (sur la poutre de droite) pour visualiser le déplacement de ces particules. Plus de détails sur <http://www.fast.u-psud.fr/gyroflow/>



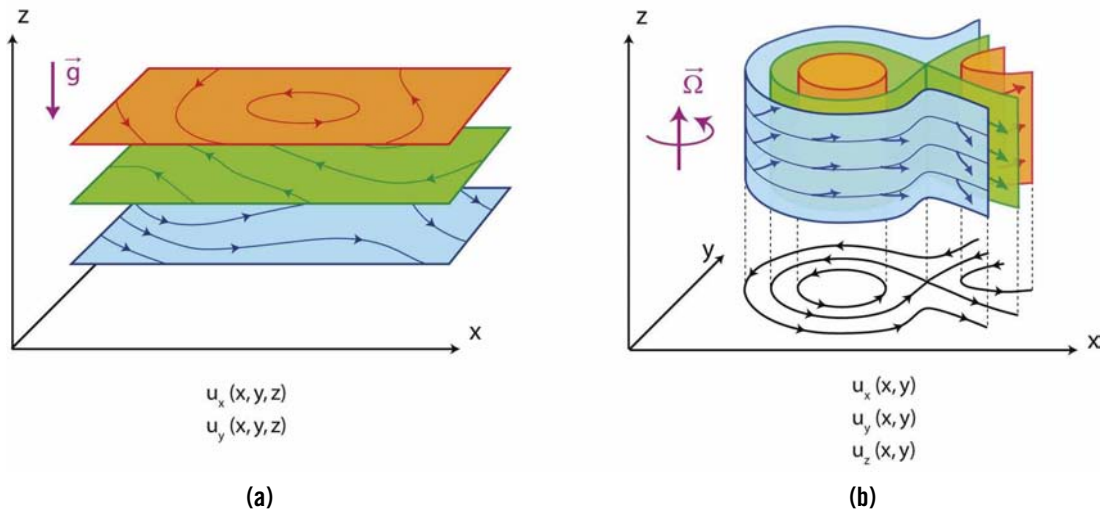
© DR

FIGURE 3

Les deux mécanismes physiques pouvant conduire à la «bidimensionalisation» d'un écoulement géophysique: la stratification (à gauche) et la rotation d'ensemble (à droite). Dans un écoulement stratifié, chaque couche fluide horizontale est contrainte à des déplacements horizontaux. Ainsi, les couches de fluide «glissent» l'une sur l'autre. La vitesse du fluide en chaque point possède donc 2 composantes (selon x et y), mais qui dépendent des

3 dimensions d'espace: l'écoulement est dit «3D-2C». Dans un référentiel tournant, sous l'effet de la force de Coriolis, un écoulement évoluant lentement par rapport à la période de rotation du référentiel sera invariant par translation selon l'axe de rotation (l'axe z ici). La vitesse du fluide en chaque point possède cette fois-ci 3 composantes, mais qui ne dépendent que de 2 dimensions d'espace (x et y): l'écoulement est dit «2D-3C». L'écoulement est alors tangent

aux surfaces isobares (représentées ici en couleur). Dans le cas de l'atmosphère, un tel écoulement, dit «géostrophique», n'est valable qu'en altitude: près du sol, les frottements brisent cet équilibre, et le vent n'est plus aligné avec les isobares. D'une manière générale, les écoulements naturels à grande échelle, sur Terre comme sur les planètes gazeuses ou possédant une atmosphère, combinent les effets de stratification et de rotation.



## 2 Le sens de rotation du tourbillon de ma baignoire dépend-il de l'hémisphère ?

On entend souvent dire que le sens de rotation du tourbillon lors de la vidange d'une baignoire ou d'un évier dépend de l'hémisphère dans lequel on se trouve. Mais il n'est pas besoin de changer d'hémisphère pour vérifier que cette rumeur n'a pas de fondement...

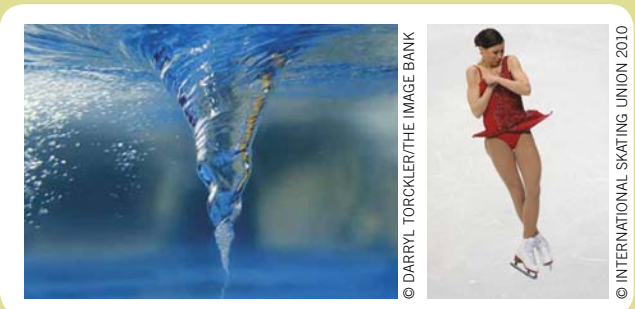
Pour commencer, remarquons qu'il suffit d'un très léger mouvement de rotation initial pour conduire à un tourbillon très intense. La raison de cette intensification est la conservation du moment cinétique (cf. Glossaire), qui est égal au produit de la vitesse angulaire par le carré du rayon de la trajectoire des éléments de fluide. C'est le même principe qu'utilise une patineuse pour réaliser la fameuse figure de la «pirouette»: en ramenant les bras et la jambe libre vers le corps, le rayon moyen sur lequel est répartie la masse de la patineuse est diminué, et sa vitesse angulaire en est donc augmentée. De même l'eau,

en convergeant radialement vers la bonde de la baignoire, va intensifier sa vitesse angulaire. Cette intensification peut atteindre un facteur 1 000 à 10 000 par rapport à la vitesse angulaire initiale.

Mais si le tourbillon provient d'une légère rotation initiale, celle-ci peut-elle être influencée par la rotation de la Terre? Pour qu'il en soit ainsi, il faudrait que la vitesse angulaire de la rotation résiduelle soit de l'ordre de celle de la Terre, ce qui correspond, pour un rayon d'une dizaine de centimètres, à une vitesse de 5 microns par seconde seulement! On comprend bien que la moindre dissymétrie de la baignoire, ou du robinet l'ayant

remplie, ou même de simples mouvements de convection liés aux fluctuations thermiques, seront amplement suffisants pour induire des vitesses bien supérieures à 5 microns/s, qui masqueront très largement l'effet de la rotation de la Terre.

Mais si vous parvenez chez vous à mettre en évidence une rotation préférentielle du tourbillon, dans des lavabos de formes différentes, n'hésitez pas à écrire aux auteurs de cet article!



de rotation du référentiel. Ainsi, contrairement à une idée fautive mais curieusement très répandue, le tourbillon de vidange d'un évier ou d'une baignoire est bien trop rapide pour être influencé par la rotation de la Terre! (encadré 2).

Si l'approximation de mouvements très lents est vérifiée, alors la dynamique de l'écoulement est régie par l'équilibre entre les variations de la pression et la force de Coriolis: c'est l'équilibre géostrophique (encadré 3). Sur les cartes météorologiques, une conséquence de cet équilibre géostrophique est que le vent en altitude est aligné selon les lignes isobares, et est d'autant plus fort que celles-ci sont resserrées. Dans cette situation, et si l'épaisseur de fluide est suffisamment importante, on montre que l'écoulement est invariant par translation le long de l'axe de rotation (figure 3b).

## Propagation d'ondes d'inertie

Si le cas des mouvements très lents est bien compris dans le cadre de cette approximation géostrophique, les écoulements évoluant sur des temps comparables à la période de rotation sont beaucoup plus complexes, et continuent de faire l'objet d'importantes recherches aujourd'hui. Une première expérience a été réalisée sur la plateforme Gyroflow, destinée à mettre en évidence l'émission d'ondes induites par des petites perturbations localisées, lorsque cette

approximation géostrophique n'est plus vérifiée. Dans cette expérience, un cylindre horizontal est mis en oscillation verticale dans de l'eau pure, à une fréquence comparable à la fréquence de rotation de la plateforme (figure 4). On observe la propagation d'une onde, synchronisée à la fréquence d'excitation, mais ne se propageant que selon un angle bien déterminé: il s'agit d'une *onde d'inertie*, encore appelée *onde gyroscopique*, qui n'existe qu'en présence de rotation, et qui joue un rôle fondamental dans les écoulements géophysiques. L'origine de ces ondes d'inertie est à trouver dans la force de Coriolis, qui agit ici comme une «force de rappel»: lorsqu'une particule est mise en mouvement, sa trajectoire est défléchie par la force de Coriolis, et elle revient à sa position initiale après avoir parcouru un cercle. Ce mouvement circulaire va se transmettre de proche en proche, initiant ainsi une propagation dans certaines directions.

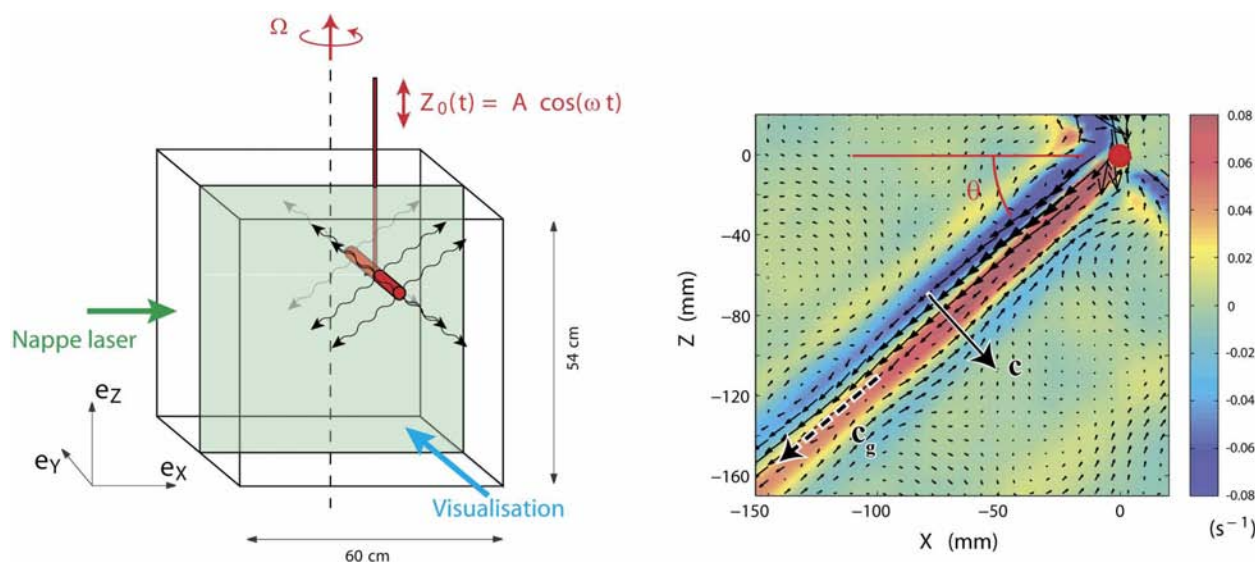
Cette propagation anisotrope\* confère à ces ondes des propriétés géométriques très surprenantes. On montre en particulier que leur vitesse de phase\*, c'est-à-dire la vitesse à laquelle avancent les «crêtes» et les «creux» de l'onde, est perpendiculaire à leur vitesse de groupe\*, qui correspond à la vitesse à laquelle se propage l'énergie injectée par la perturbation. Cette propriété de dispersion\* très particulière distingue ces ondes d'inertie de la plupart des systèmes d'onde en milieu isotrope que l'on rencontre en physique, comme les ondes de surface

FIGURE 4

Onde d'inertie générée par l'oscillation verticale d'un cylindre horizontal (en rouge), immergé dans une cuve d'eau tournant à vitesse angulaire  $\Omega$ . L'onde se propage selon 4 faisceaux, faisant un angle par rapport à l'horizontale tel que  $\cos \theta = \omega / 2\Omega$ , où  $\omega$  est la pulsation de l'oscillation. Le champ de vitesse, mesuré par la technique de Vélocimétrie par Images de Particules

(PIV), montre que la vitesse du fluide est colinéaire au faisceau, avec une alternance de signe. En fait, pendant une période d'oscillation, le vecteur vitesse décrit un cercle dans le plan du faisceau, dont on ne voit ici que la projection dans le plan de mesure vertical. La vitesse de groupe  $\vec{c}_g$  est le long du faisceau: elle indique la propagation de l'énergie injectée par

la perturbation. La couleur est liée au taux de cisaillement local, qui code ici la phase de l'onde. Contrairement aux ondes isotropes classiques, ici la vitesse de phase est *perpendiculaire* au faisceau: les bandes rouges et bleues avancent selon la direction donnée par  $\vec{c}$ , puis s'évanouissent lorsqu'elles sortent de l'enveloppe de l'onde.



(les « vagues »), les ondes acoustiques, ou encore les ondes électromagnétiques, pour lesquelles vitesse de phase et de groupe sont colinéaires. On peut remarquer que si la fréquence de la perturbation devient très petite, la vitesse de groupe des ondes d'inertie

devient alignée avec l'axe de rotation : on retrouve bien la bidimensionalité des mouvements très lents de l'approximation géostrophique.

### 3 L'équilibre géostrophique

Dans un référentiel non tournant, les éléments de fluide se mettent en mouvement lorsqu'ils subissent un déséquilibre de pression : ils acquièrent une vitesse en « descendant » des hautes vers les basses pressions. Dans un référentiel tournant, en plus des forces de pression, les éléments de fluides sont aussi sujets à la force centrifuge ainsi que, s'ils sont en mouvement, à la force de Coriolis. L'effet de la force centrifuge est en fait de même nature que la gravité, et il n'est pas nécessaire de la considérer ici. La force de Coriolis, en revanche, aura une influence profonde sur la trajectoire de la particule fluide, et sera à l'origine du phénomène de bidimensionalisation des écoulements en rotation.

Si l'écoulement est suffisamment lent comparé à la période de rotation du référentiel, une particule fluide donnée pourra être considérée comme étant pratiquement à l'équilibre, c'est-à-dire que la somme des forces (force de Coriolis et force de pression) agissant sur elle est pratiquement nulle : on parle d'équilibre géostrophique. Or, on sait que la force de Coriolis n'agit que dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation. Le long de l'axe de rotation, il n'y a donc pas de force de Coriolis, et donc pas de gradient de pression pour l'équilibrer : dans cette approximation, la pression, et donc la vitesse, ne varient donc pas selon l'axe de rotation. Ce résultat important porte le nom de théorème de Taylor-Proudman (1916) : le champ de vitesse est invariant par translation le long de l'axe de rotation. Ainsi, si un élément de fluide quelconque est mis en mouvement, c'est toute la colonne fluide s'appuyant sur cet élément et parallèle à l'axe de rotation qui va être « rigidement » asservie à ce mouvement.

Appliqué à l'atmosphère terrestre, ce théorème stipule que les lignes isobares que l'on voit sur les cartes météorologiques seraient en fait des surfaces isobares, invariantes selon la verticale locale. Ce n'est pas vrai en pratique du fait du ralentissement du vent près de la surface de la Terre, où l'approximation d'équilibre géostrophique ne s'applique plus. En altitude, où l'équilibre géostrophique constitue une approximation correcte, le vent s'écoule le long des isobares, et ce d'autant plus rapidement que celles-ci sont rapprochées.

## Turbulence en rotation

Cette propagation anisotrope de l'énergie joue un rôle essentiel dans la structuration de la turbulence sous l'effet d'une rotation du référentiel. Nos expériences actuelles, en collaboration avec le Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) à Grenoble, visent à décrire la façon dont un écoulement turbulent, initialement isotrope, tend à devenir bidimensionnel sous l'effet de la rotation du référentiel. Pour cela, nous avons mis en place un dispositif expérimental dans lequel une grille est rapidement translaturée dans un fluide initialement au repos dans le référentiel tournant. L'écoulement turbulent ainsi généré dans le sillage de la grille est initialement isotrope (**figure 5a**), et suffisamment rapide pour que la rotation du référentiel ne se fasse pas encore sentir. Cependant, l'énergie cinétique de cet écoulement turbulent va décliner au cours du temps, du fait de la dissipation par friction visqueuse. Ce faisant, les mouvements vont devenir plus lents, et l'effet de la rotation va peu à peu devenir important. Lorsque la fréquence caractéristique de la turbulence atteint celle de la rotation du référentiel, des mécanismes de propagation anisotrope tels que ceux décrits précédemment vont devenir actifs. Il va en résulter une « structuration » anisotrope progressive de la turbulence (**figure 5b**), sous forme de colonnes quasiment invariantes selon l'axe de rotation. Ces colonnes verticales sont les prémisses de l'état bidimensionnel asymptotique de l'approximation géostrophique. On remarquera toutefois que cet état quasi-bidimensionnel ne signifie pas que l'écoulement est strictement horizontal : des fluctuations verticales continuent à exister, mais celles-ci évoluent peu selon l'axe vertical.

Si l'évolution depuis un écoulement turbulent tridimensionnel isotrope vers un écoulement quasi-bidimensionnel est bien mise en évidence par ces visualisations, cette transition garde néanmoins quelques aspects surprenants. Observons cette fois-ci l'écoulement dans le plan horizontal, perpendiculaire à l'axe de rotation, au cours de sa décroissance (**figure 6**). On voit que peu de temps après l'initialisation de la turbulence, l'écoulement présente des fluctuations désordonnées à petite échelle. Au fur et à mesure de la décroissance de la turbulence, ces fluctuations s'organisent spontanément sous forme de grands tourbillons. Dans le vocabulaire de la météorologie, ces tourbillons sont appelés *cyclones* s'ils tournent dans le même sens que le référentiel, ou *anticyclones\** dans le cas inverse. Chose surprenante ici : tandis que les fluctuations initiales font apparaître autant de rotations *cycloniques* qu'*anticycloniques* en moyenne, on voit qu'une « brisure de symétrie »

FIGURE 5

Structuration anisotrope d'un écoulement turbulent en référentiel tournant. Les champs de vitesse sont mesurés dans un plan vertical ( $x,z$ ), l'axe de rotation étant

selon  $z$ . L'image de gauche, obtenue après 2 tours du référentiel, est quasiment isotrope, tandis que l'image de droite, après 64 tours, montre une nette tendance à

l'invariance selon  $z$ . Le code couleur utilisé ici est lié au taux de cisaillement local (gradient de vitesse).

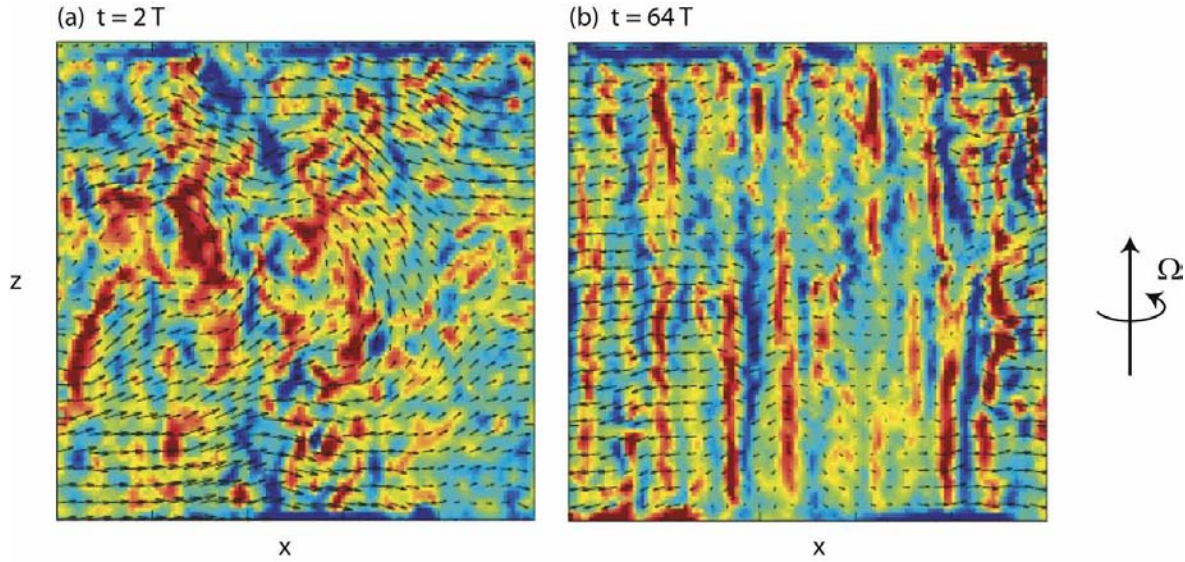
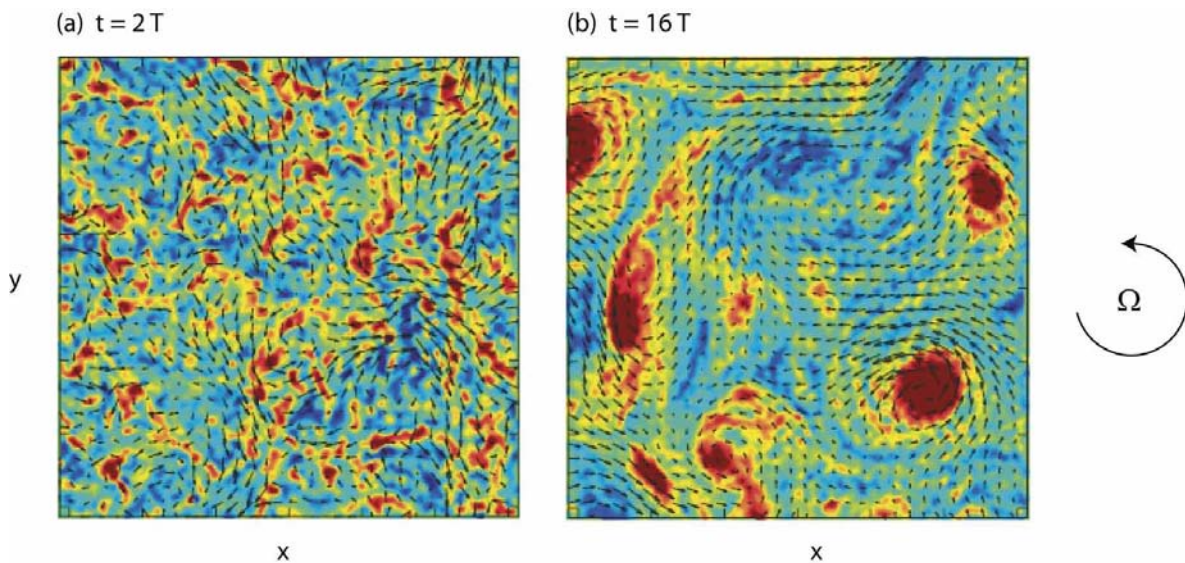


FIGURE 6

Emergence de tourbillons cycloniques lors de la décroissance de la turbulence en référentiel tournant. Les champs de vitesse sont mesurés ici dans le plan horizontal ( $x,y$ ), et la rotation du référentiel est dans le sens inverse des aiguilles d'une

montre. Le code couleur utilisé ici est lié au taux de rotation local (vorticité). Le rouge correspond à une rotation *cyclonique*, et le bleu à une rotation *anti-cyclonique*. L'image de gauche, obtenue après 2 tours du référentiel, montre des fluctuations

présentant autant de rotation cyclonique qu'anticyclonique, tandis que l'image de droite, après 16 tours, montre l'apparition de grands tourbillons cycloniques: il s'agit d'une brisure de la symétrie cyclone-anticyclone.



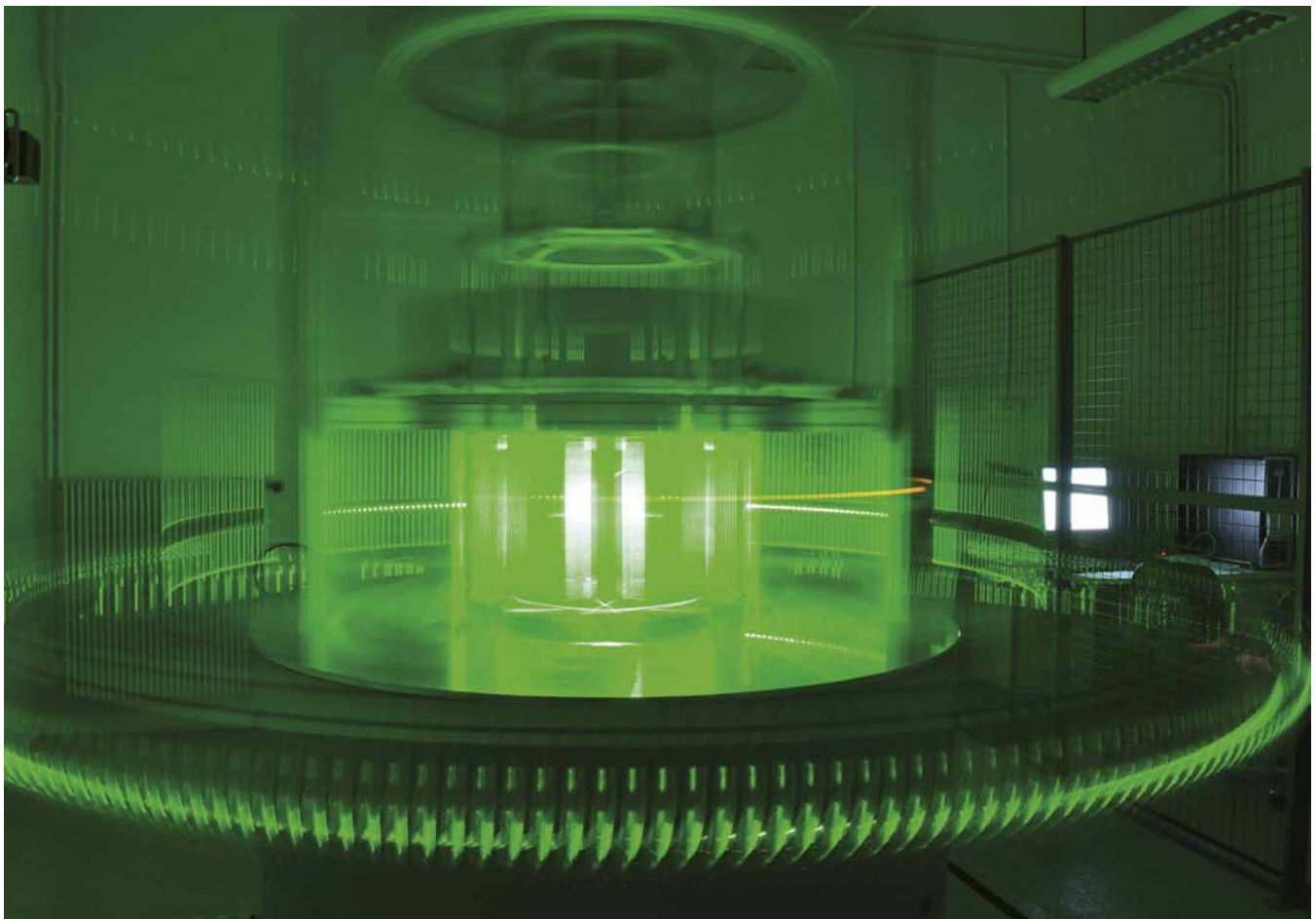


apparaît progressivement : la rotation locale, ou vorticit<sup>\*</sup>, devient majoritairement organisée en grands tourbillons cycloniques, relativement stables dans le temps. Les tourbillons anti-cycloniques sont beaucoup plus rares, et de manière générale bien moins intenses que les cyclones.

D'où vient une telle asymétrie cyclone-anticyclone ? Cette question n'est pas complètement tranchée aujourd'hui, et fait encore l'objet d'intenses recherches, tant expérimentales que théoriques. Les ondes d'inertie évoquées plus haut ne peuvent expliquer une telle asymétrie à elles seules : en effet, lorsqu'elles sont de faible amplitude, ces ondes présentent des oscillations de vorticit<sup>\*</sup> purement symétriques, comme le montre l'alternance des bandes rouges et bleues sur la figure 4. En revanche, lorsque l'amplitude de ces ondes devient importante, ou bien lorsque plusieurs ondes interagissent entre elles, des effets *non linéaires* (c'est-à-dire non décrits par une théorie de faibles amplitudes, dite *linéaire*) peuvent apparaître, qui eux seuls peuvent conduire à une telle brisure de symétrie. Une interprétation physique simple de ces mécanismes non linéaires peut être toutefois évoquée : comme on l'a vu pour la vidange d'un tourbillon de baignoire, un mouve-

ment radial de convergence peut amplifier la vitesse angulaire. Or, dans un référentiel tournant, ce raisonnement doit être appliqué à la vitesse angulaire *totale*, somme de la vitesse angulaire du tourbillon et de celle du référentiel. Ainsi, une vitesse angulaire totale plus élevée, sera préférentiellement amplifiée par ce mécanisme. Les « anticyclones parfaits », de vitesse angulaire totale nulle (compensation exacte des rotations), ne seront pas amplifiés du tout, et seront ainsi statistiquement défavorisés.

Si cet argument d'amplification sélective est séduisant, il est loin d'expliquer les aspects plus quantitatifs de cette brisure de symétrie, qui résistent encore à l'analyse. A noter que cette dissymétrie ne doit pas être confondue avec celle observée pour les *cyclones tropicaux* ou les *ouragans*, toujours de rotation cyclonique. Ces cyclones, qui se forment dans les zones intertropicales au-dessus des mers chaudes, sont des systèmes beaucoup plus complexes que ceux étudiés ici, dans lesquels les phénomènes thermodynamiques (évaporation, transport vertical de chaleur latente et condensation) jouent un rôle clef. Il est remarquable de constater toutefois que notre système, qui se veut une simplification extrême



Vue de la plateforme en rotation, prise avec un temps de pose de 10 secondes.

d'un écoulement géophysique réel, et dans lequel seul l'effet de la rotation terrestre est retenu, peut lui aussi présenter un tel degré de complexité. De nombreuses expériences sont encore nécessaires pour comprendre finement les mécanismes physiques à l'œuvre dans cette structuration des écoulements turbulents en présence de rotation.

Ces interactions entre turbulence et ondes anisotropes, mises en évidence ici dans le cadre de la turbulence en rotation, constituent en fait un problème général dans les fluides géophysiques et astrophysiques. On retrouve en effet cette problématique dans les fluides stratifiés (interaction turbulence - ondes internes), ainsi que dans les plasmas (interaction turbulence - ondes magnétiques, ou encore « ondes d'Alfvén »). Le phénomène de vent stellaire, ou les éruptions dans la couronne solaire, sont autant d'illustrations de la richesse de ces systèmes physiques complexes où les ondes et les structures turbulentes sont intimement couplées. ■

## 4 Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (projet « HiSpeed PIV ») ainsi que le Triangle de la Physique pour le financement de la plateforme Gyroflow. Joël Sommeria (Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels, Grenoble) et Cyprien Morize (FAST, Université Paris-Sud) sont également remerciés pour leur collaboration sur les expériences de turbulence en rotation.

## Glossaire

### **Anticyclone / Dépression :**

Les tourbillons tournant dans le même sens que le référentiel en rotation sont appelés « cyclones », et sont associés à une dépression. Inversement, les « anticyclones » présentent eux une surpression. Dans le vocabulaire de la météorologie, l'usage a retenu le couple « anticyclone / dépression » pour les grands écoulements atmosphériques, le terme « cyclone » étant lui réservé à des événements cycloniques intenses se formant le plus souvent au-dessus des mers chaudes (également appelés ouragans ou typhons selon les régions du monde).

### **Force de Coriolis :**

Force d'inertie s'appliquant à une masse en mouvement dans un référentiel non Galiléen, et en particulier dans un référentiel en rotation (voir l'encadré 1).

### **Isotropie :**

Indépendance d'une propriété physique vis-à-vis de l'orientation dans l'espace. Dans un fluide stratifié ou en rotation, l'existence d'une direction privilégiée confère des propriétés *anisotropes* aux phénomènes physiques, comme la propagation d'ondes selon certaines directions bien définies.

### **Moment cinétique :**

Dans le cas d'un mouvement de rotation, le moment cinétique est donné par  $m r^2 \omega$ , où  $m$  est la masse,  $r$  le rayon de la trajectoire et  $\omega$  la vitesse angulaire. On montre que cette quantité, fondamentale en physique, reste constante si les forces s'exerçant sur la masse passent par le centre de rotation.

### **Onde dispersive :**

Onde présentant des vitesses de phase et de groupe différentes. Si de surcroît les directions de ces vitesses diffèrent, comme c'est le cas pour les ondes d'inertie, on parle de *dispersion anisotrope*.

### **Vitesse de phase :**

Vitesse à laquelle avancent les maxima et minima (les crêtes et les creux) d'une onde.

### **Vitesse de groupe :**

Vitesse de propagation de l'énergie d'une onde.

### **Vorticité :**

Taux de rotation local des éléments de fluide. Elle est donnée par le rotationnel du champ de vitesse,  $\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{u}$ . Dans le cas d'un tourbillon circulaire, la norme de ce vecteur vaut deux fois la vitesse angulaire du tourbillon.