



HAL
open science

Plate-forme tournante instrumentée pour la dynamique des fluides de l'environnement

Muriel Lagauzere, Samuel Viboud, Thomas Valran, Joël Sommeria

► **To cite this version:**

Muriel Lagauzere, Samuel Viboud, Thomas Valran, Joël Sommeria. Plate-forme tournante instrumentée pour la dynamique des fluides de l'environnement. C2i2019 : 8ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Jan 2019, Talence, France. hal-02065275

HAL Id: hal-02065275

<https://hal.science/hal-02065275>

Submitted on 14 Mar 2019

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.

Plate-forme tournante instrumentée pour la dynamique des fluides de l'environnement

Muriel Lagauzère⁽¹⁾, Samuel Viboud⁽¹⁾, Thomas Valran⁽¹⁾, Joël Sommeria⁽¹⁾

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble-INP, LEGI, 38000 Grenoble, France

1. Introduction

La plateforme Coriolis, 13 m de diamètre (cf. Figure 1), est la plus grande plateforme tournante au monde dédiée à la mécanique des fluides. Elle a été construite en 2014 sur le modèle d'une ancienne installation datant de 1960. La conception des systèmes de contrôle-commande et d'instrumentation a cependant été entièrement revue selon les standards actuels.

Son activité principale est la modélisation expérimentale des écoulements géophysiques, avec prise en compte de la rotation de la Terre, en présence ou non de stratification en densité ou de topographie. Les grandes dimensions permettent d'approcher les régimes inertiels qui caractérisent la dynamique océanique ou atmosphérique, avec une faible influence de la viscosité et de la force centrifuge (assimilable à une composante radiale de la gravité apparente). Les processus complexes multi-échelles d'instabilités et de mélange turbulent peuvent ainsi être reproduits en similitude.



Figure 1. La plate-forme tournante « Coriolis »

La similitude avec les milieux naturels repose sur quatre paramètres sans dimension qui représentent respectivement les effets de viscosité, de Coriolis, de stratification en densité (obtenue par salinité ou température), et le rapport géométrique entre échelles horizontales L et verticales H .

- le nombre de Reynolds UH/ν représentant l'importance des effets de la viscosité cinématique ν ;
- le nombre de Rossby $U/(L\Omega)$ représentant l'influence de la rotation ambiante, de vitesse angulaire Ω ;
- le nombre de Froude interne $U/(LN)$ représentant l'influence de la stratification en densité, caractérisée par $N=(g\delta\rho/\rho H)^{1/2}$, fréquence d'oscillation verticale des particules fluides dans un milieu dont la densité décroît relativement de $g\delta\rho$ sur la hauteur H ;
- le rapport d'aspect L/H .

Les milieux naturels (aux échelles intermédiaires, 10-100 km pour l'océan) sont caractérisés par des nombre de Reynolds élevés, des nombres de Rossby et de Froude petits ou de l'ordre de 1, et de grands rapports d'aspect. La plate-forme « Coriolis » permet de reproduire les nombres de Froude et de Rossby, tout en approchant les conditions de grand rapport d'aspect et de grand nombre de Reynolds propice à la turbulence.

2. Caractéristiques techniques de la plate-forme

2.1 Mécanique

La plate-forme proprement dite est un plateau tournant nervuré en béton armé de diamètre 16 m et d'épaisseur 0.8 m. Une virole métallique circulaire, de hauteur 1,20 m, y délimite une cuve de diamètre intérieur 13 m. La bande extérieure restante jouxte une passerelle circulaire fixe permettant l'accès des personnes. Le tout est surmonté d'un portique support d'instrumentation et de caméras, ainsi que d'une paroi extérieure protégeant les expériences du vent dû à la rotation. Le fond de cuve et la virole périphérique sont équipés de fenêtres en verre pour la visualisation et l'éclairage.

La charge totale est de 225 tonnes à vide, augmentée d'une masse d'eau pouvant atteindre 130 t. Elle repose d'une part sur un roulement à bille conique central et d'autre part sur un rail périphérique roulant sur un ensemble de 20 galets. Parmi ceux-ci 10 galets sont équipés d'un moteur réglé pour entraîner la plate-forme. Sa période de rotation peut être réglée entre 10 s and 6000 s, avec une stabilité relative de 10^{-4} . La puissance de chaque moteur est de 3,5 kW. La charge sur chaque galet est mesurée en permanence par capteur piézoélectrique, ce qui permet une répartition équilibrée des charges par un réglage fin de hauteur de chaque galet et du roulement central. Ces réglages permettent aussi un ajustement fin de l'horizontalité, avec une précision de 0,01 mm sur 13 m.

Tout le système est contrôlé numériquement par un automate piloté par une Interface Homme Machine (IHM). Ceci inclut un contrôle de la mécanique, de la partie électrique et du réseau hydraulique complet des installations.

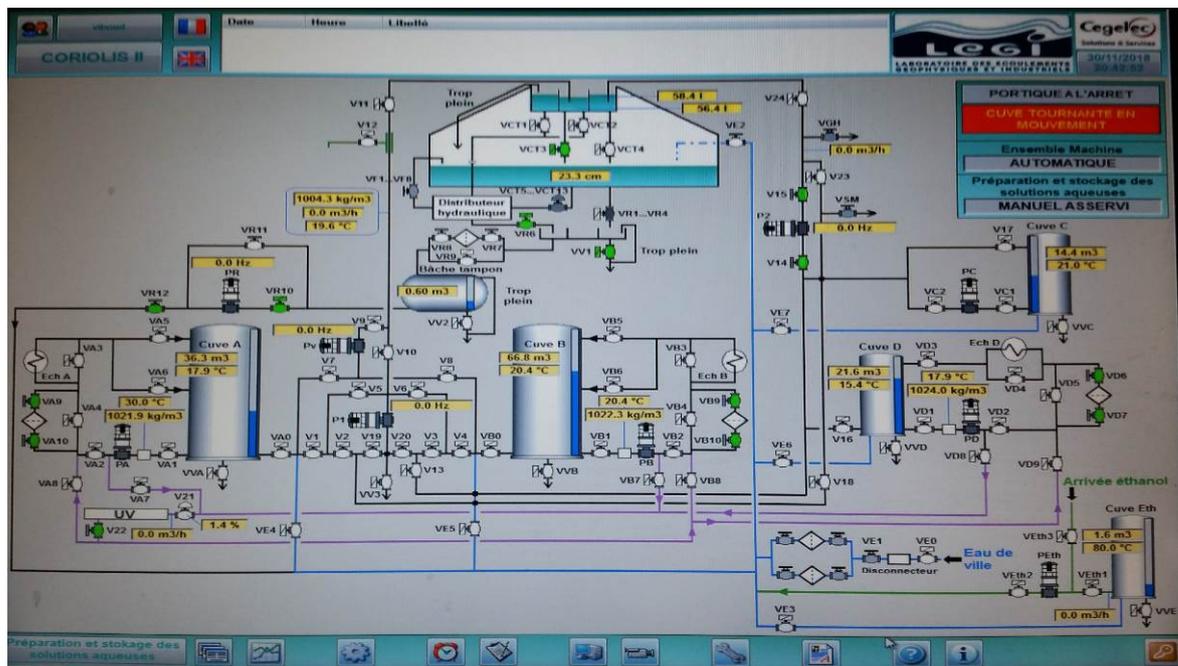


Figure 2. Interface du logiciel de contrôle commande hydraulique

2.2 Hydraulique

Un système hydraulique permet de préparer de l'eau de salinité et température contrôlées dans deux grandes cuves de capacité 100 m³ chacune, représentées par A et B sur le schéma de la Figure 2. Le sel est introduit sous forme de galets solides dans une cuve de capacité 30 m³ (cuve C), la dissolution étant favorisée par une circulation d'eau en circuit fermé. Une 4^e cuve D de 30 m³ peut être utilisée pour préparer une solution de densité différente de A et B. Enfin une 5^e cuve de 10 m³ permet de préparer une solution d'éthanol utile pour réaliser une stratification en densité à indice de réfraction constant.

La cuve d'expérience est alimentée par un mélange issu des cuves A et B en proportion contrôlée numériquement grâce à une pompe volumétrique. Cela permet d'introduire en fond de cuve une eau de densité variable permettant de réaliser une stratification en densité de profile contrôlé. Pour éviter le

mélange vertical lors de cette opération, le flux est réparti en fond de cuve sur un ensemble de ... orifices équipés de disques minces diffusant le flux horizontalement (diamètre 1 m). Le flux issu des cuves A et B passe respectivement par deux petites cuves collectrices concentriques situées en hauteur sur l'axe, ce qui permet un remplissage pendant la rotation. Le cas de stratification le plus standard est un gradient constant de densité (stratification linéaire). On peut aussi réaliser une stratification multicouche constituée de couches homogènes de densité différente, ou une stratification décroissant avec la profondeur de façon exponentielle, qui représente bien la situation océanique.

Chaque orifice de fond de cuve est équipé d'une électrovanne permettant de contrôler son ouverture. Ceci permet aussi de vider la cuve, ce qui est possible pendant la rotation grâce à un collecteur circulaire entourant le roulement central. Un système de recyclage et purification à l'ozone permet de récupérer l'eau de vidange. Celle-ci peut être ensuite réintroduite dans les cuves principales A et B (sans toutefois en extraire le sel).

2.3 Systèmes électriques et informatiques

Un système de contacts tournants permet d'amener le réseau électrique 220 V sur la plate-forme en rotation, pour alimenter instruments, ordinateurs, lasers et autres systèmes d'éclairage. La puissance totale disponible est de 100 kW. Cela permet aussi de réaliser du chauffage électrique pour expériences de convection thermique.

Les données des instruments et les images de caméras sont numérisées sur la plate-forme et transmis sur le réseau informatique du laboratoire grâce à une fibre optique monomode à 10 Gbits/s. Un contact tournant situé sur l'axe de rotation permet la liaison entre fibre fixe et fibre mobile.

3. Instrumentation

Le matériel de mesure comporte des vélocimètres à ultra-sons, des profileurs de salinité et de température. Les mesures sont de plus en plus axées sur le traitement numérique d'images. Les champs de concentration en colorant sont ainsi obtenus par fluorescence laser (LIF), et les champs de vitesse par corrélation d'images (PIV). Ces techniques permettent des mesures tridimensionnelles en volume par un système de balayage de plan laser.

3.1 Les sondes de conductivité

Les sondes de conductivité utilisées proviennent de la société pme[1]. Elles mesurent la conductivité électrique locale de la solution par un système à 4 électrodes, dont deux servent à introduire le courant et deux autres à mesurer la différence de potentielle associée (cf. Figure 3). Ces sondes sont associées à un dispositif électronique qui intègre un pont ainsi qu'un préamplificateur en extrémité du support de sonde pour limiter les parasites électriques. La précision correspond à 1% de l'étendue de mesure.

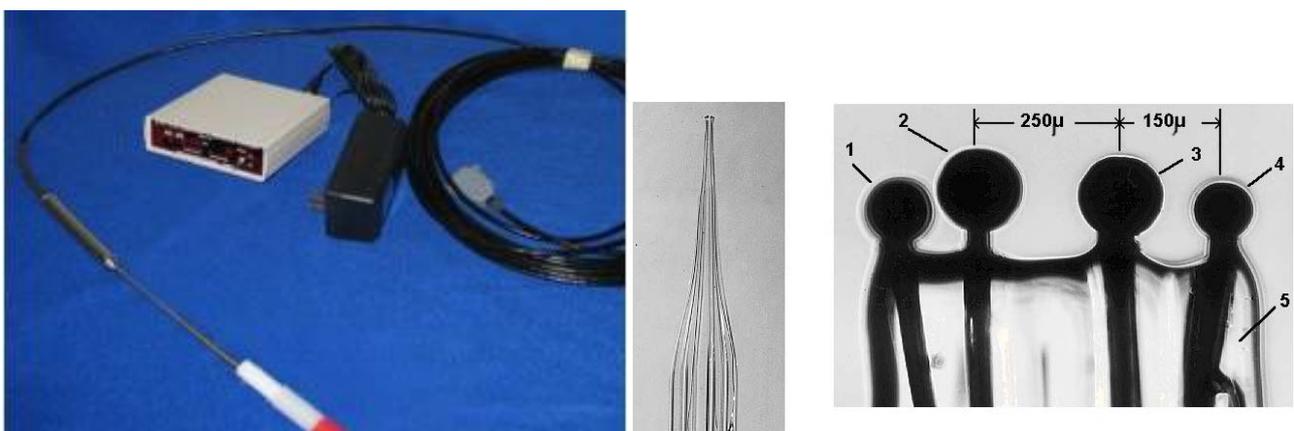


Figure 3. Sondes de conductivité utilisée (société pme), avec zoom sur le capteur à 4 électrodes (à droite)

La conductivité, de même que la densité, dépendent principalement de la salinité. La dépendance en température n'est cependant pas toujours à négliger. Un capteur de température à thermistance

proche de la sonde de conductimétrie permet de traduire la conductivité en densité, avec la correction appropriée en température. C'est en effet la densité qui est la quantité pertinente pour la dynamique.

Ce dispositif est donc composé de deux sorties analogiques, l'une linéairement proportionnelle à la conductivité de la solution ($\pm 5V$) et l'autre dépendant non linéairement de la température, en lien avec la dépendance non-linéaire de la résistance électrique de la thermistance. Les signaux sont envoyés par câble coaxial sur une carte d'acquisition A/D pilotée par le logiciel Labview, qui pilote aussi des séquences de déplacement sur trois axes permettant d'obtenir des profils de densité (voir section 3.3).

3.2 *Le vélocimètre acoustique*

Le Vectrino (cf. Figure 4) est un vélocimètre acoustique haute résolution utilisé pour mesurer les fluctuations de la vitesse de l'eau avec ses trois composantes dans un petit volume (6 mm) et à des fréquences d'échantillonnage allant jusqu'à 200 Hz. Il est possible de sélectionner la gamme de vitesses à mesurer de façon logicielle (jusqu'à 4 m/s). Il peut être appliqué dans une variété d'environnements, des laboratoires hydrauliques - où il est considéré comme un équipement standard - à l'océan. Il est idéal pour les mesures de débits proches de la couche limite ou pour capter tout phénomène dynamique dans un réservoir hydraulique.

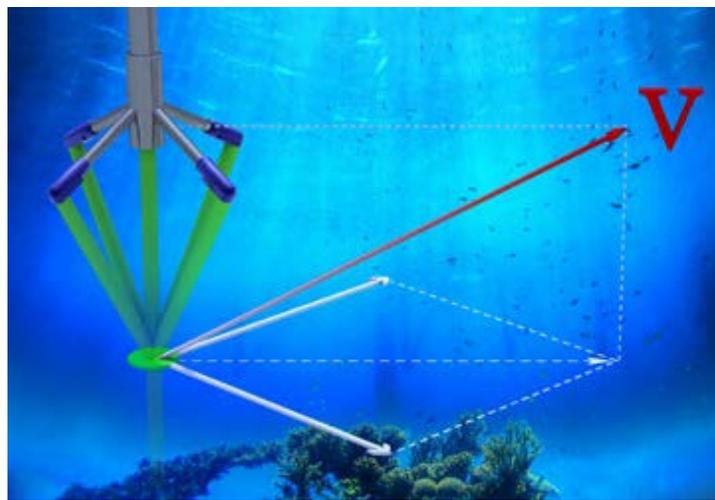


Figure 4. Mesure par Vectrino

Les mesures par dispositif Vectrino sont couplées au système de déplacement motorisé des sondes. A chaque arrêt du déplacement, un signal numérique est envoyé pour déclencher la mesure par vélocimétrie acoustique.

3.3 *Motorisation et logiciel d'acquisition de données et de déplacement des sondes*

Sondes et instruments peuvent être déplacés par un ensemble de trois systèmes de translation linéaire de course 1 m. Ceux-ci sont motorisés et asservis en position (vendus par Schneider), et guidés sur des rails équipés chacun de deux fins de course. Les moteurs brushless sont alimentés par trois variateurs Lexium équipés d'une carte Ethernet pour la communication Modbus TCP. La technologie de ces variateurs est du temps réel ce qui signifie que chaque variateur attend la réception d'une écriture dans ses registres toutes les 120 ms. En cas de non réception d'une écriture, la communication avec le variateur est coupée.

Cette technologie permet de gérer rapidement de façon logicielle les arrêts d'urgence et les remises à zéro d'erreurs. Par contre, il nécessite une programmation adéquate pour la gestion de ce temps réel intégrant des événements logiciels. Pour une meilleure précision dans nos déplacements de sondes, nous avons fait le choix d'un codeur absolu de haute précision de 128 lignes par pas de moteur.

Le logiciel d'acquisition et de contrôle commande (programmé sous Labview, cf. Figure 5) permet le déplacement d'un, de deux ou de trois axes de façon simultanées ou non. Les déplacements peuvent être la réalisation d'un mouvement absolu, relatif ou bien une séquence de mouvements.

Les données d'instruments sont enregistrées de façon synchronisée au déplacement, grâce une carte d'acquisition A/D National Instrument. Les vélocimètres acoustiques sont activés à chaque arrêt de déplacement par une sortie numérique TTL de la carte d'acquisition. Ceci déclenche également un autre système de génération de signaux TTL destiné à déclencher les images de cameras.

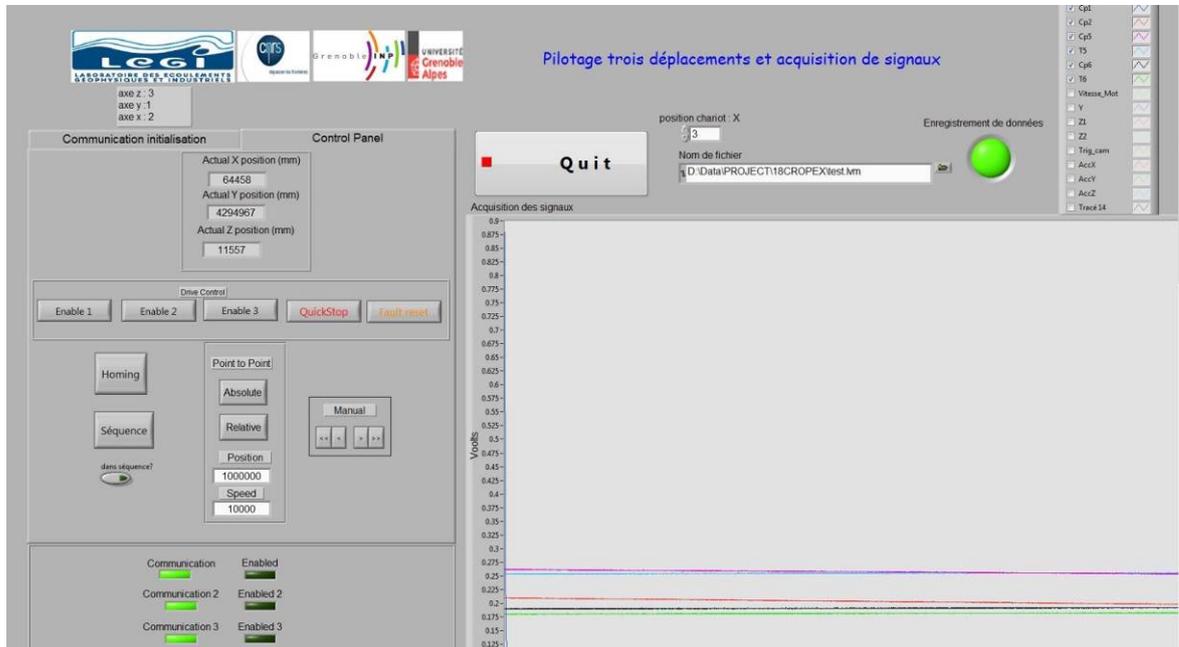


Figure 5. Panneau de commande du logiciel d'acquisition A/D et de contrôle du déplacement de sondes (développé sous Labview)

3.4 : Mesures par imagerie

Deux lasers Yag continus (longueur d'onde 532 nm après doubleur de fréquence) sont disponibles, de puissance 6 et 25 Watts respectivement, permettant de réaliser des nappes laser verticales ou horizontales. La nappe est produite par un miroir oscillant (fréquence 100 Hz), par un barreau lentille cylindrique, ou par un miroir tournant incliné à 45° (cf. Figure 6). Ce dernier, situé sur l'axe central, permet d'éclairer l'ensemble de la cuve par une nappe horizontale. L'épaisseur de nappe est typiquement de 5 mm. La nappe elle-même peut être déplacée pour balayer un volume. Ceci permet de faire de la LIF (Laser Induced Fluorescence) en volume, ou d'obtenir le champ de vitesse par PIV (Particle Imaging Velocimetry PIV), cf. Figure 6. Plusieurs types de particules en plastique sont utilisés pour ensemercer le fluide avec une densité proche de l'eau pour limiter la sédimentation.

Trois modes opératoires peuvent être alors utilisés. Le mode « multi-niveau » consiste à acquérir plusieurs images au même niveau, puis recommencer à une position différente. Cela permet de balayer un volume en moyenne, mais ne donne pas la structure 3D à un instant donné. La technique de balayage en volume consiste au contraire à balayer rapidement un volume à deux reprises, et à comparer les images dans les deux séries[2]. Deux approches sont alors possibles : soit comparer deux à deux les images à chaque niveau, produisant des champs 2D en volumes[3] (les vitesses mesurées étant des projections perpendiculaires à la prise de vue). La deuxième approche consiste à considérer les deux séries d'images comme des images 3D et d'en déduire le champ de vitesse 3D. Le temps de calcul est alors nettement supérieur et la méthode nécessite de balayer le volume avec une bonne résolution.

Plusieurs cameras peuvent être utilisées simultanément, soit pour couvrir un champ plus grand, soit pour combiner vue à grande échelle et zoom local, soit pour obtenir des champs de vitesse à 3 composantes par vision stéréoscopique[4]. Enfin deux cameras peuvent être utilisées pour combiner

une mesure simultanée de champs de vitesse par PIV avec une mesure de champs de concentration par LIF[5]. Le colorant fluorescent est introduit avec l'eau salée est sert de marqueur de la salinité, donc de la densité, durant les processus de mélange.

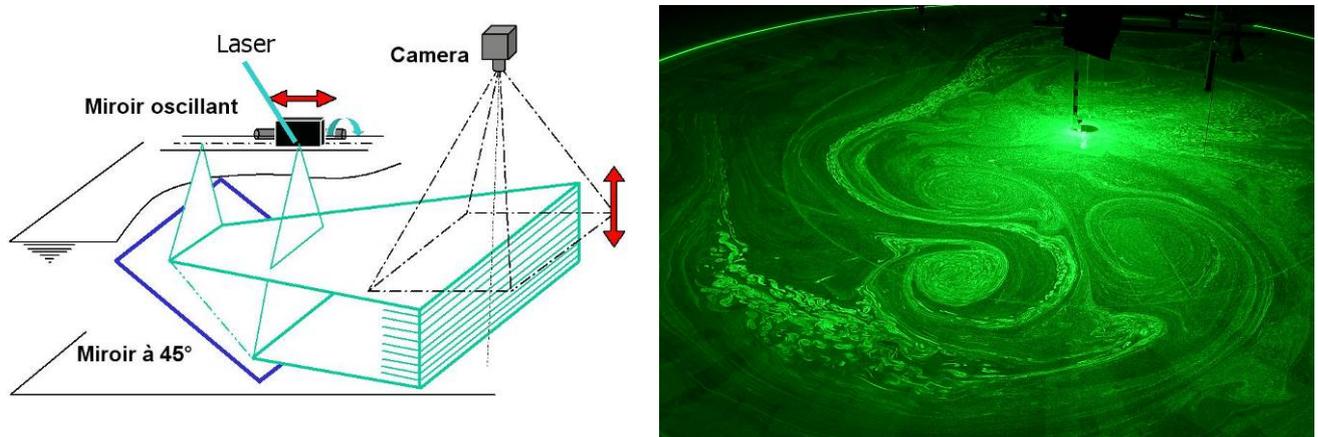


Figure 6. Système de translation de tranche laser (schématisé à gauche), et miroir tournant permettant d'éclairer la totalité de la cuve (13 m de diamètre) par une nappe laser (photo à droite). Le milieu est ici ensemencé de particules de plastique (pliolite) de diamètre 60 μm .

4. Références

1. <https://www.environmental-expert.com/products/pme-model-125-microscale-conductivity-and-temperature-instrument-mscti-62609>.
2. O. Praud, J. Sommeria, and A. M. Fincham, «Decaying grid turbulence in a rotating stratified fluid», *J. Fluid Mech.* 547, pp 389-412 (2006).
3. G. Delerce et al. "Vélocimétrie par imagerie de particules 3 dimensions 3 composantes." *Colloque FLUVISU 11*. (2005).
4. Q. Aubourg, A. Campagne, C. Peureux, F. Ardhuin, J. Sommeria, S. Viboud, and N. Mordant, « Three-wave and four-wave interactions in gravity wave turbulence », *Phys. Rev. Fluids* 2, 114802 (2017).
5. A. Stern et al., «The effect of geometry on ice shelf ocean cavity ventilation: a laboratory experiment », *Experiments in Fluids* 55.5, pp 1719 (2014).
6. A. Cuthbertson et al. «Blockage of saline intrusions in restricted, two-layer exchange flows across a submerged sill obstruction», *Environmental Fluid Mech.* 18.1, pp 27-57 (2018).