

# TP M2 semaine GFD 2023

## Fluides en rotation

Dans un référentiel en rotation, un écoulement de fluide est soumis à la force d'inertie d'entraînement, radiale, centrifuge, et à la force de Coriolis. Cette dernière est orthogonale à la vitesse et à l'axe de rotation. Son existence conduit à des comportements intéressants, parfois contre-intuitifs.

Nous allons en observer quelques-uns à l'aide d'une cuve remplie d'eau et mise en rotation. La vitesse de rotation peut être réglée par la tension continue appliquée par d'une alimentation stabilisée au moteur qui entraîne la cuve. Attention, pour un bon fonctionnement, la pression de la roulette d'entraînement sur le bord de la cuve doit être optimale. Elle est réglée à l'aide d'un élastique pouvant être plus ou moins tendu. Si la pression est trop forte, la cuve est freinée, mais si la pression est trop faible, la roulette glisse sur le bord de la cuve, alors qu'une rotation à vitesse constante nécessite un roulement sans glissement.

Une GoPro, fixée sur une plaque de plexiglass posée sur le dessus de la cuve, connectée à une tablette, permet d'observer le fluide du dessus dans le référentiel tournant. Il est possible, depuis la tablette, de prendre de photos ou des vidéos.

## 1 Temps de mise en rotation

Les expériences qui vont être faites nécessitent que tout le fluide soit dans un premier temps en rotation solide. Il faut donc attendre un certain temps après avoir mis la cuve en rotation. Afin d'estimer ce temps, nous allons effectuer l'observation d'un "spin-down" (mise à l'arrêt d'un fluide en rotation). L'avantage du spin-down est qu'il peut être observé dans le référentiel du labo, alors qu'un "spin-up" doit être observé dans le référentiel tournant, donc avec une caméra, ce qui est plus compliqué techniquement, avec le laser peu puissant dont nous disposons.

Une cuve de fluide,ensemencée avec des particules de PIV (vélocimétrie par imagerie de particules) a été préalablement mise en rotation solide par les encadrants avant le début du TP. On observe les particules en les éclairant avec un laser. On arrête la rotation et on observe le ralentissement des particules, pour estimer le temps de mise à l'arrêt de l'ensemble du fluide.

## 2 Invariance de la vitesse selon la verticale : théorème de Taylor-Proudman

Le théorème de Taylor-Proudman (nommé pour G. I. Taylor et Joseph Proudman) stipule que la vitesse d'un fluide en rotation (supposée faible devant la vitesse du référentiel tournant) est invariante le long de toute ligne verticale. Si l'on place un obstacle au fond de la cuve, un écoulement à faible vitesse ne peut pas contourner l'obstacle par le dessus, car cela impliquerait une variation de vitesse verticale. Il contournera donc l'obstacle par le côté, même

au-dessus de l'obstacle, donnant ainsi l'illusion qu'une colonne de fluide "rigide" se trouve à la verticale de l'obstacle.

Afin d'observer cet effet, une fois la rotation solide obtenue, on lâche un peu de colorant dans le fluide, à proximité (mais pas au-dessus de) l'obstacle et on varie très légèrement la vitesse de rotation (avec la tension d'alimentation du moteur), pour créer un écoulement à faible vitesse dans le référentiel tournant.

### 3 Effet de la viscosité : couche d'Ekman

Le théorème de Taylor-Proudman ne s'applique que loin des parois contenant le fluide. En effet, au voisinage des parois, les effets de viscosité entrent en jeu. Contrairement à l'intérieur du fluide, où, lorsque le fluide est en mouvement dans le référentiel tournant, le gradient de pression est équilibré par la force de Coriolis (équilibre géostrophique), au voisinage d'une paroi, les effets visqueux ne peuvent plus être négligés et l'équilibre géostrophique est rompu. Les forces de viscosité réduisent la vitesse, ce qui conduit à une réduction de la force de Coriolis. Celle-ci n'équilibre donc plus le gradient de pression et le fluide se déplace alors vers les basses pressions. La localisation des basses pressions sera au centre de la cuve pour un écoulement cyclonique (dans le même sens que la rotation) et à l'extérieur pour un écoulement anticyclonique.

Une fois le fluide en rotation solide, on lâche quelques cristaux de permanganate de potassium dans la cuve, qui tomberont sur le fond. On place aussi un petit morceau de papier, qui flottera, pour indiquer le sens de rotation de l'écoulement dans le référentiel tournant. Puis on ralentit légèrement la rotation pour créer un écoulement cyclonique. Observer. Ensuite on accélère légèrement la rotation pour créer un écoulement anticyclonique. Observer.

### 4 Observation d'une instabilité : l'instabilité barocline

Dans cette partie, nous allons observer une instabilité caractéristique des mouvements atmosphériques à grande échelle. Une boîte de conserve est placée au centre de la cuve, initialement vide, sauf un poids pour la maintenir au fond. Une fois la rotation solide atteinte, on remplit la boîte avec un mélange de glace pilée et d'eau. La boîte se refroidit donc et on crée ainsi un gradient thermique dans la cuve, avec un fluide plus froid au centre et plus chaud vers l'extérieur. On peut accentuer ce gradient thermique en chauffant la paroi externe de la cuve avec un sèche-cheveux placé judicieusement. On place ensuite du colorant, en utilisant deux couleurs différentes, l'une pour le centre froid (bleu par exemple) et l'autre pour l'extérieur chaud (rouge par exemple).

On observe alors l'apparition de l'instabilité dite *barocline* sous la forme de cellules colorées. Le nombre de cellules est d'autant plus grand que la vitesse de rotation est grande. Si le temps le permet, on peut essayer de faire l'expérience plusieurs fois avec différentes vitesses de rotation et représenter la longueur d'onde caractéristique en fonction de la vitesse de rotation.