

Laboratory production of vortices in a stably stratified fluid

Joël Sommeria

LEGI

col. G. Bordes, ENS Lyon,

J.B. Flor, LEGI

Project OLA: Ocean Layering

Motivations:

- understand how energy is dissipated from geostrophic flow in the ocean
- understand the role of 'layering' and quantify its contribution to energy dissipation.

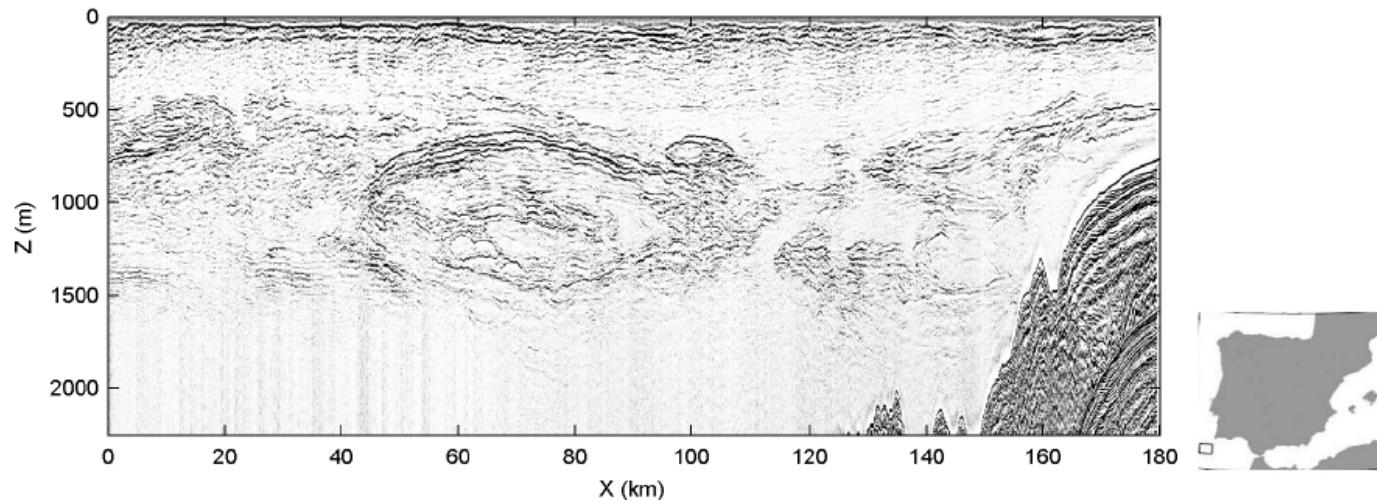


Figure 1: Seismic image of the internal ocean structure in the Gulf of Cadiz (right inset) during the GO experiment (Courtesy D. Klaeschen & C. Papenberg). Note the presence of a newly formed Meddy in the middle of the domain. The figure horizontal extension is 180km long and it covers the top 2300m of the water column.

OLA

Collaboration LPO (talk by Claire Menesgen)

with:

Ladhyx (Palaiseau), talk by Paul Billant

LEGI (Grenoble)

IRPHE (Marseille), talk by Patrice

Meunier

Lien Hua:

‘I have learned more about ocean from
laboratory experiments than from cruises’

Vortex production by mechanical stirring in a cylinder

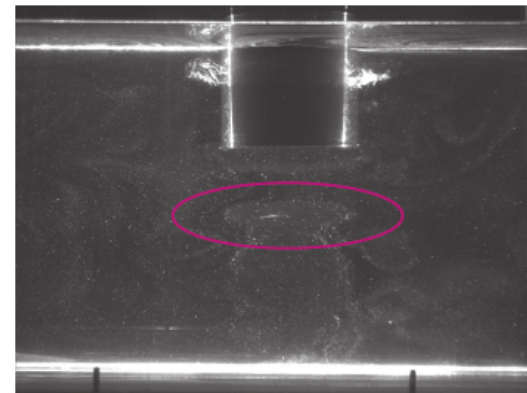
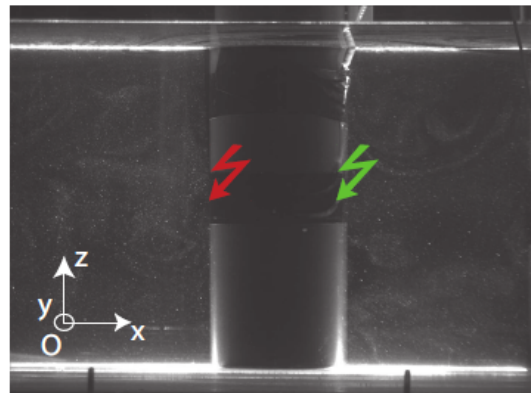
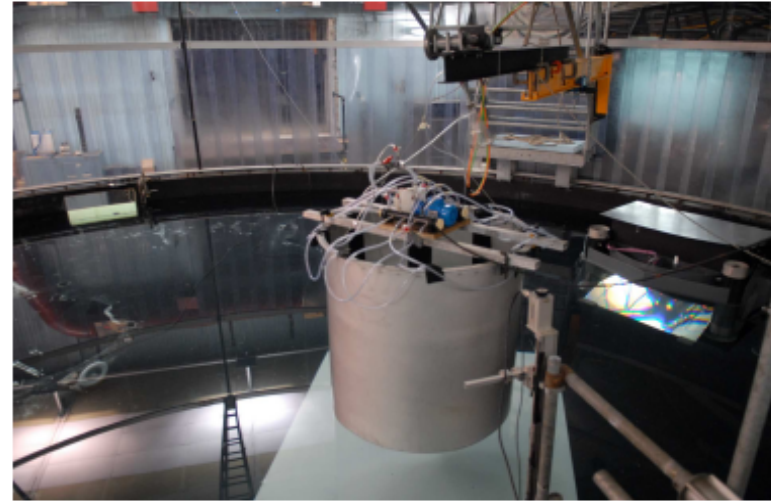
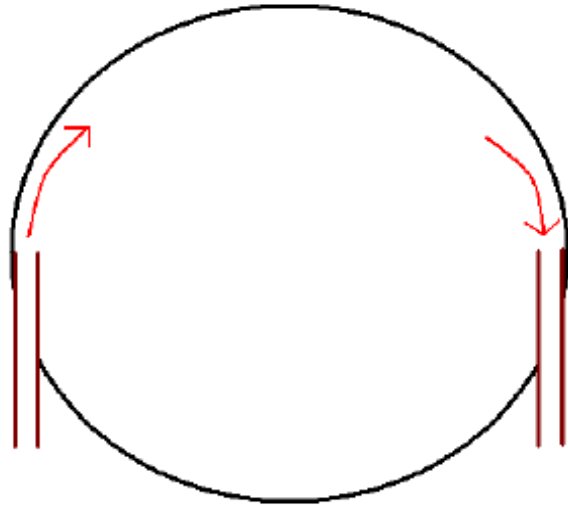
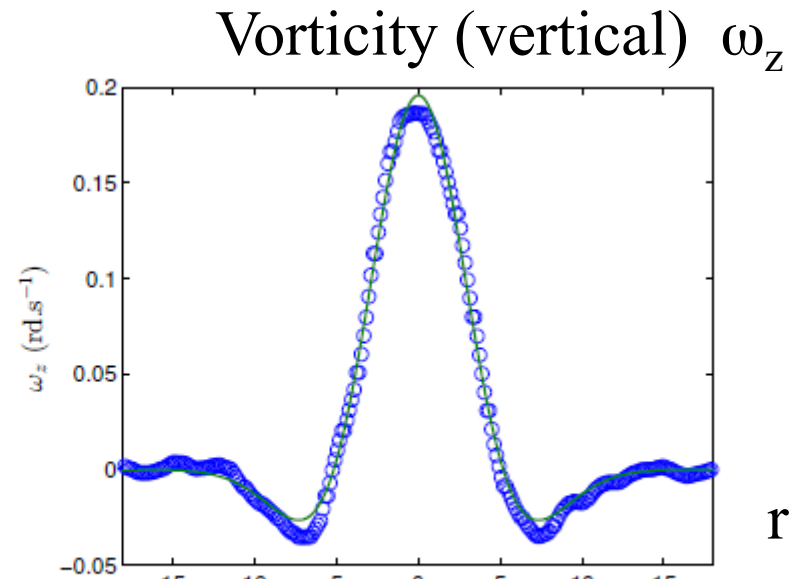
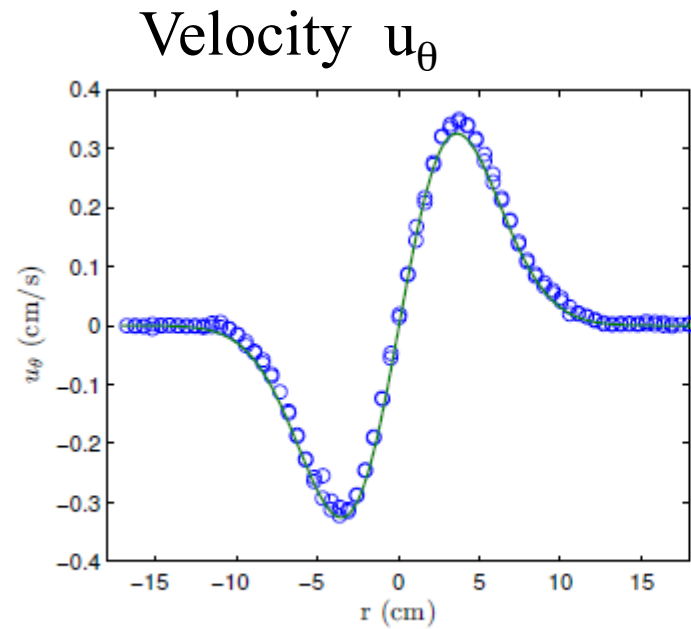


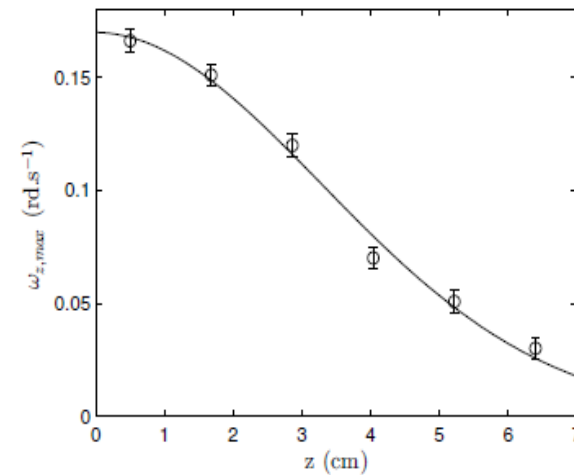
FIGURE 5.2 – Vues de côté représentant un cylindre de 15 cm de diamètre dans 35 cm d'eau stratifiée. Le cylindre est posé au fond de la cuve, et après une dizaine de minutes ce dernier est retiré. Les flèches verte et rouge sur la figure de gauche indiquent les endroits de pompage et de réinjection du fluide.

Viscous regime

Re=100: $u=0.3$ cm/s, radius $L=5$ cm (ENS Lyon, G. Bordes)



radius



Z

Self-similar solution (viscous)

Dynamics of pancake-like vortices in a stratified fluid: experiments, model and numerical simulations , M. BECKERS , R. VERZICCO , H. J. H. CLERCX and G. J. F. VAN HEIJST

$$u_\theta = u(r, t)h(z, t).$$

$$u = C \frac{r}{2(\nu t)^2} \exp\left(-\frac{r^2}{4\nu t}\right)$$

$$h^*(z) = \frac{1}{(2\pi\Lambda^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(z/L)^2}{2\Lambda^2}\right)$$

$$R(t) = L \left(1 + \frac{4\nu}{L^2}t\right)^{1/2}$$

$R(t)$ = vortex radius

Λ = vortex aspect ratio (thickness/radius)

Turbulent regime

$Re=5000$, $u=1$ cm/s, $L=0.5$ m

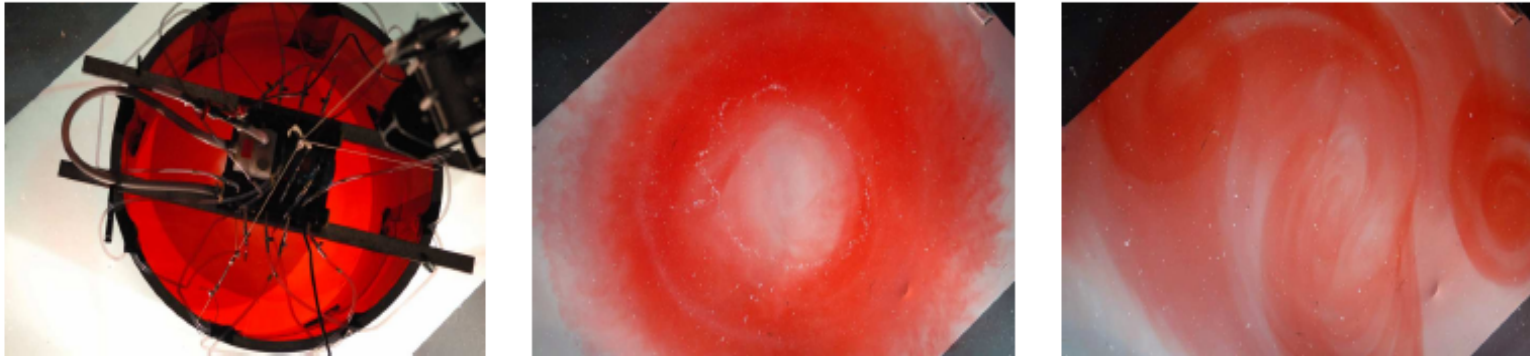


FIGURE 5.10 – Evolution temporelle suivi par colorant d'un tourbillon généré à l'aide d'un cylindre de 120 cm de diamètre. L'image de droite a été prise pendant le pompage. L'image centrale a été prise quelques secondes après le retrait du cylindre et l'image de droite 5 min après.

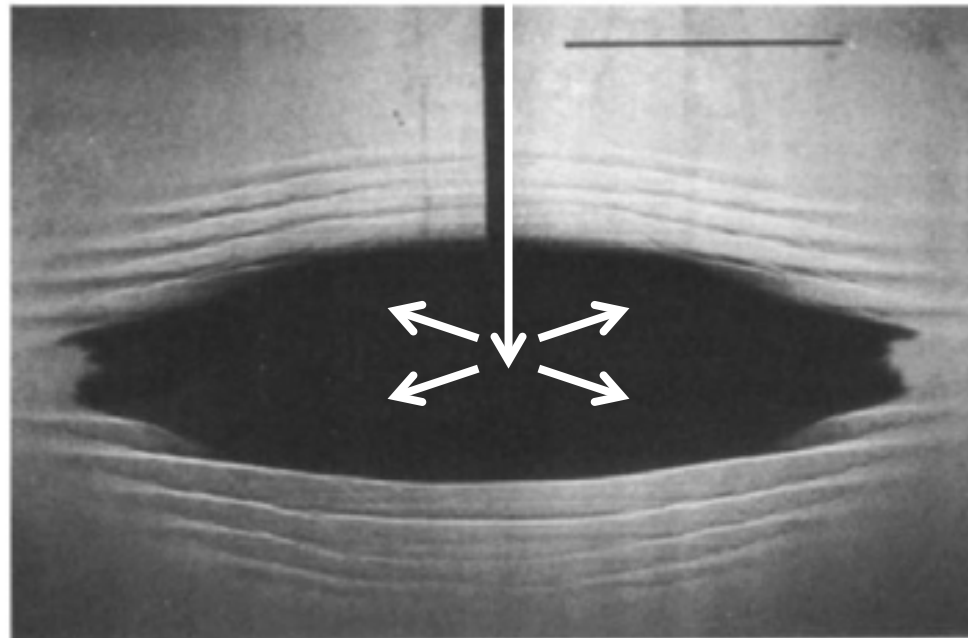
Instability +3D turbulence develop, no steady state

with Coriolis effect: barotropic instability (ring of negative vorticity)

Forcing by injection (anticyclone)

Hedstrom and Armi (JFM 1988)

Griffith and Linden (1981)



Forcing by injection (Coriolis platform)

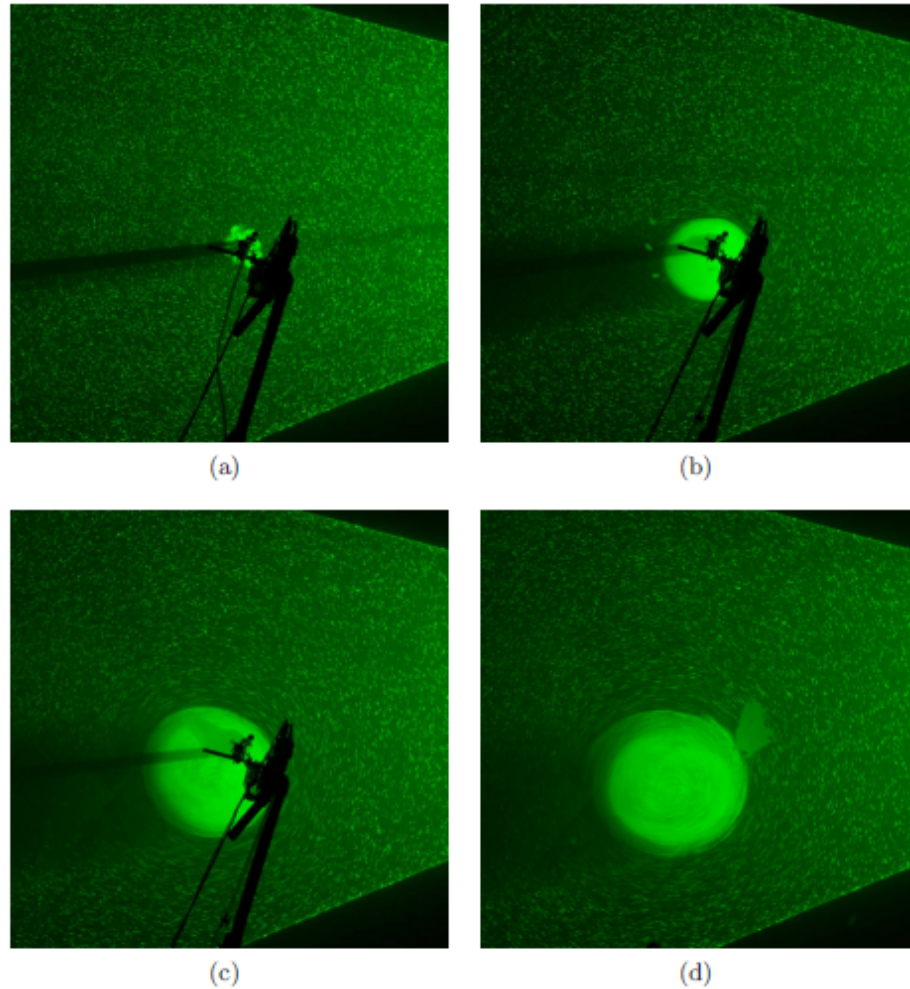


FIGURE 5.13 – Génération d'un tourbillon antyclonique de volume $V = 20 L$, à $t = 1$ min (a), 7 min (b), 17 min (c) et 27 min (d) après le début de l'injection de fluide homogène à l'altitude $z = 45$ cm.

Bigger vortex

Two problems:

- baroclinic instability (for radius $>$ Rossby radius)
- drift by residual motion

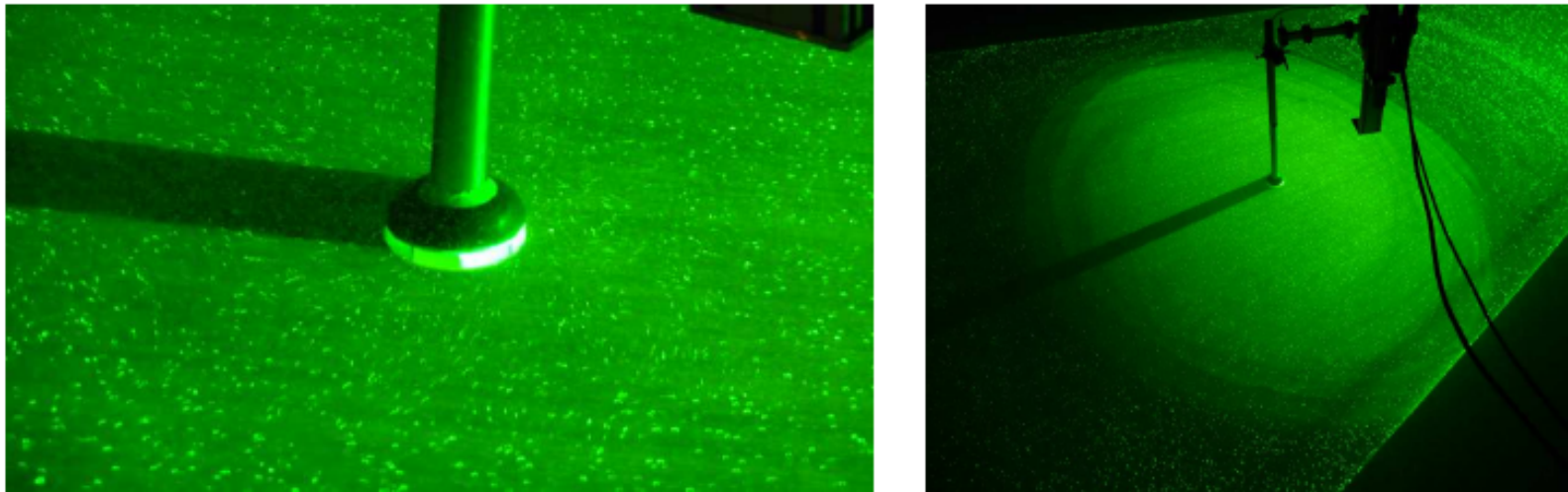
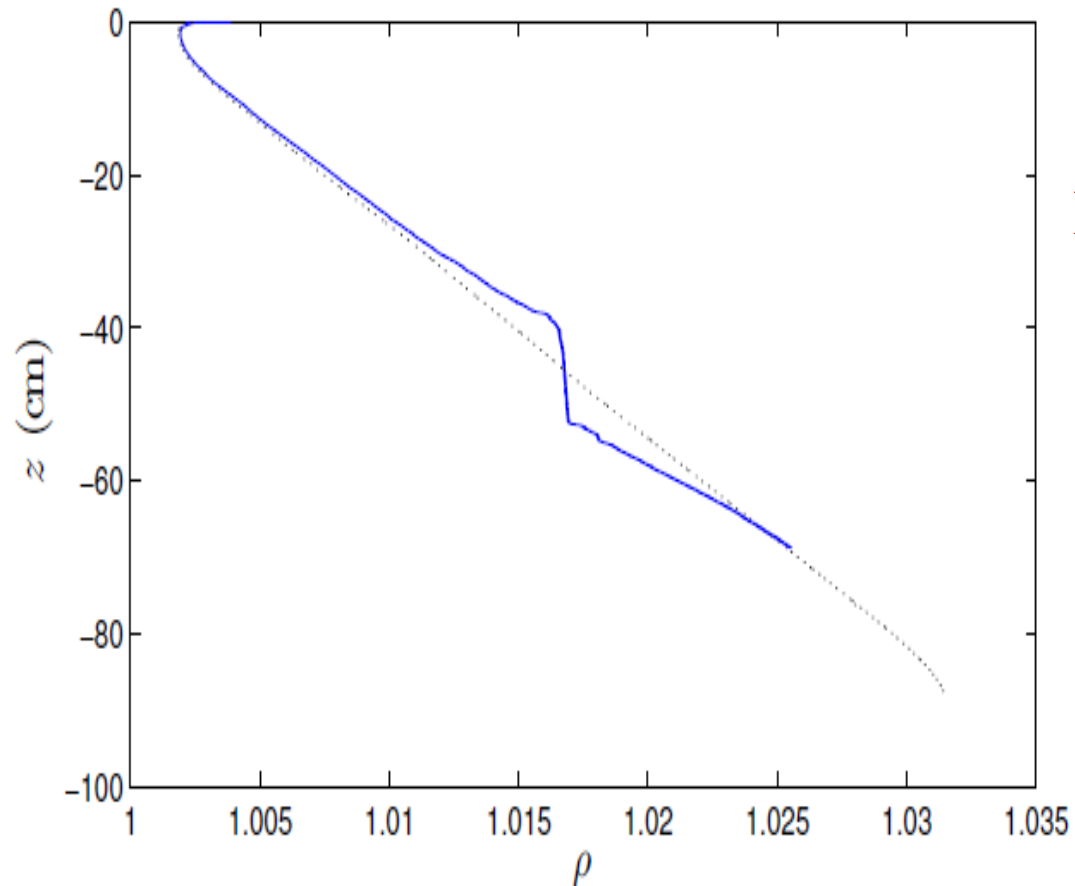


FIGURE 5.12 – (a) Système d’injection de fluide pour la création de vortex anti-cyclonique en milieu stratifié tournant. (b) Génération d’un vortex anticyclonique de volume $V = 300 L$, 50 minutes après le début de l’injection.

Vertical density profile



Solid: vortex ($r=35$ cm)

Dash: background

Velocity and vorticity (median plane)

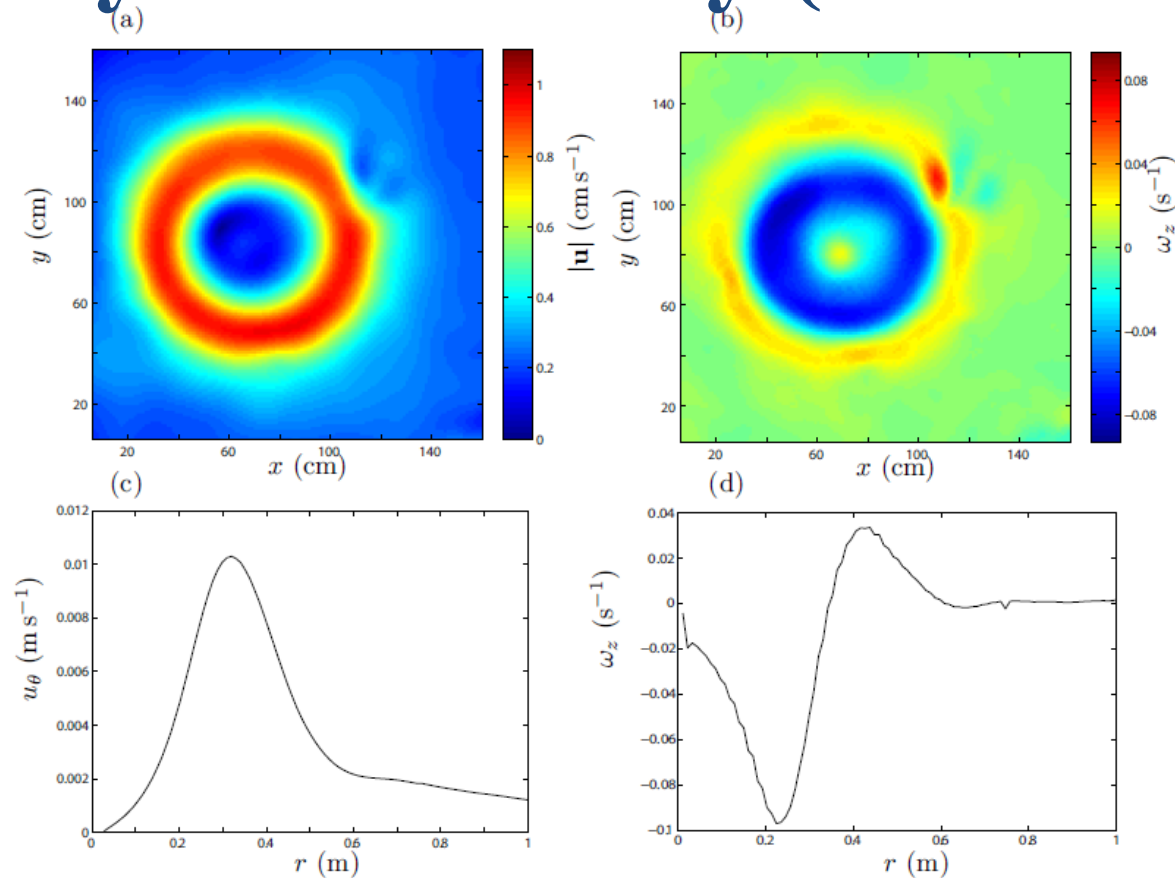


FIGURE 5.14 – Norme de la vitesse (a) et Vorticité associée (b) à $t=181$ s, dans le plan médian du tourbillon, après l’injection totale de 20 L de fluide homogène de densité ($d = 1.0169$) dans un fluide stratifié de pulsation de Brunt-Väisälä $N = 0.60$. Profils expérimentaux de vitesse azimuthale $u_\theta(r, z = 0)$ (c), et de vorticité verticale $\omega_z(r, z = 0)$ (d), à $t = 181$ s.

Vorticity

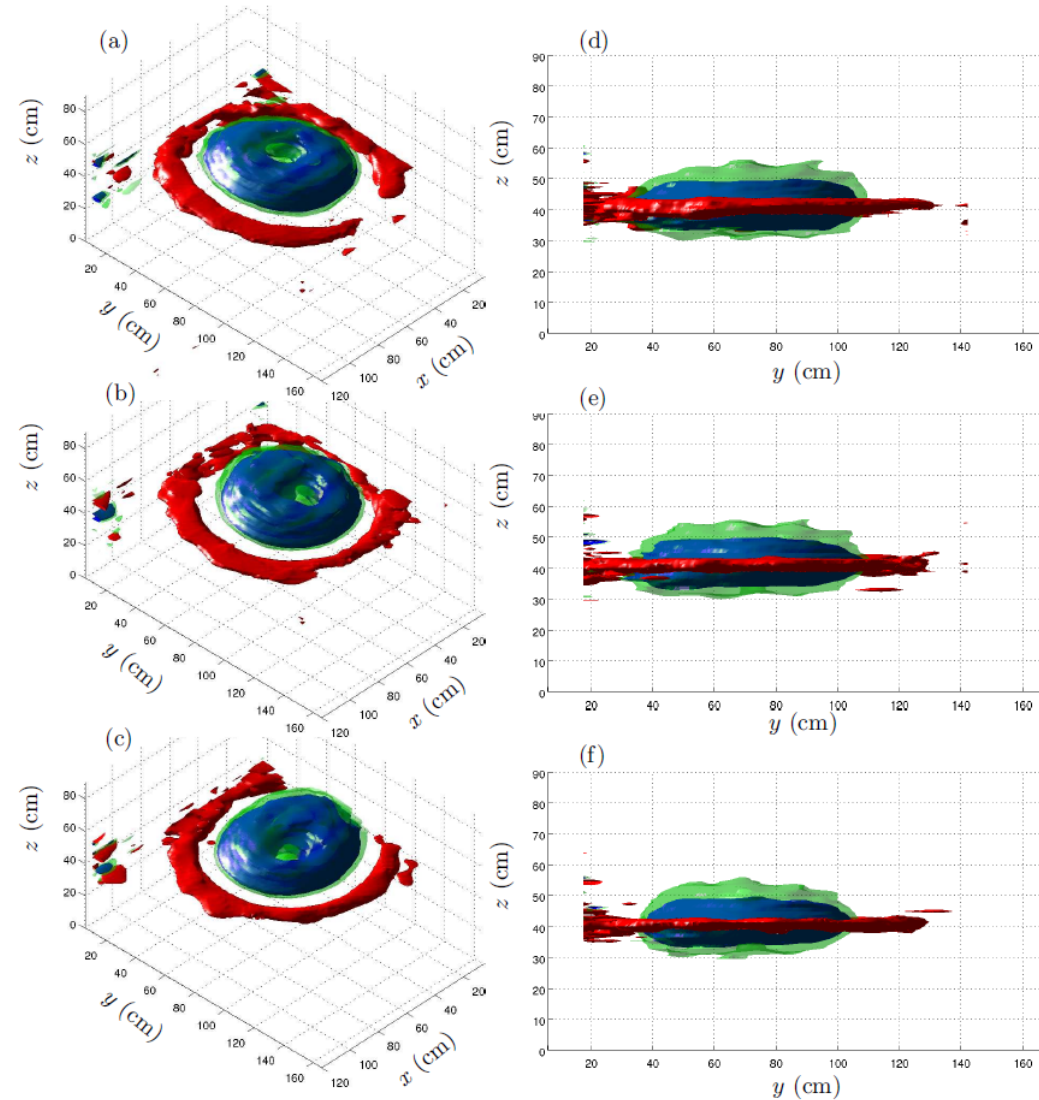


FIGURE 5.15 – Isosurfaces de vorticité 14 minutes après le retrait de l'injecteur en (a) et (d). Les images (b,e) et (c,f) représentent le même champ 1 min 30 s après ou 3 min après les images (a,d) respectivement. L'anneau extérieur de vorticité positive, en rouge, est l'isosurface de la vorticité verticale $\omega_z = 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ rad.s}^{-1}$. L'anneau intérieur, bleu foncé, est l'isosurface de vorticité verticale $\omega_z = -0.015 \text{ rad.s}^{-1}$ et la surface verte en transparence est l'isosurface $\omega_z = -0.010 \text{ rad.s}^{-1}$.

Potential vorticity determination

$$q = -(\omega + f\mathbf{e}_z) \cdot \nabla \ln \rho, \quad \text{Ertel's PV}$$

$$\partial_r p = \rho \left(f u_\theta + \frac{u_\theta^2}{r} \right), \quad \text{Cyclogeostrophic balance}$$

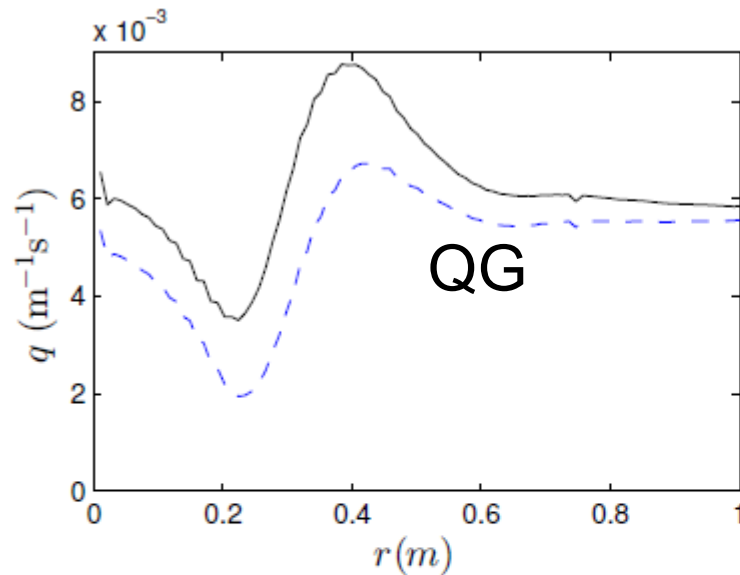
$$\partial_z p = -\rho g. \quad \text{Hydrostatic balance}$$

$$\ln \rho(r, z) = \ln \rho_\infty(z) - \frac{1}{g} \int_r^\infty \left(f + \frac{u_\theta}{r} \right) \partial_z u dr.$$

Potential vorticity: radial profile

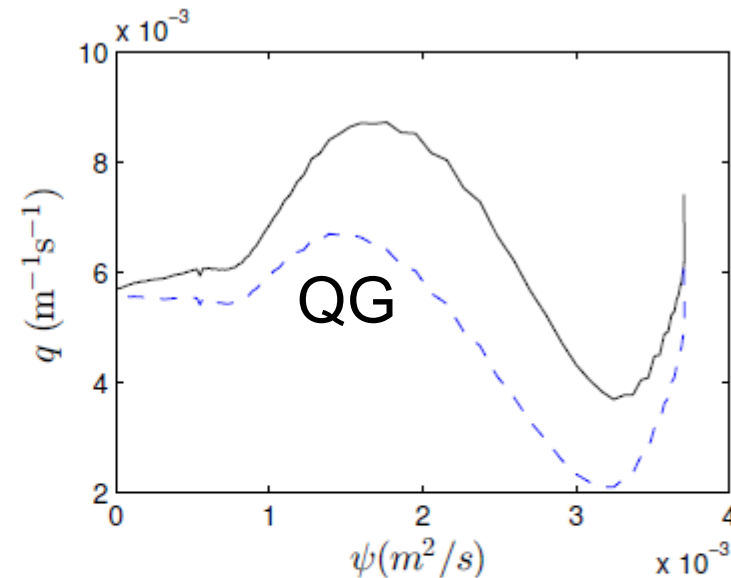
time=181 s, z=0

PV



radius

PV



stream function

FIGURE 5.19 – Vorticité potentielle en fonction de r à gauche et en fonction de ψ à droite pour $t = 181$ s et $z = 0$. La ligne pleine est la vorticité potentielle totale avec la correction due à la densité. La ligne en traits pointillés représente la grandeur approchée $(\omega_z + f)N^2/g$.

Instabilities ?

Richardson number

$$Ri = N^2 / (\partial_z u)^2 \quad \text{experiments: } Ri \sim 10$$

Baroclinic instability
(Ooyama 1966)

$$Ri > Ri_1 = \frac{f + 2u/r}{f + u/r + \partial_r u},$$

(stability)

$$Ri_1 \sim 1$$

Double-diffusive instability
(Mc Intyre, 1975)

$$Ri > Ri_2 = \frac{f(Sc + 1)^2}{4Sc(f + \partial_r u)},$$
$$Ri_2 \sim 175$$

**Instability expected, but no
hint observed:**

no significant mixing effect

Sc = Schmidt nbre, viscosity/diffusivity

Conclusions

- **No stable state monopole obtained by mechanical stirring at high Re**
- **A stable monopole is produced by the injection method (rotating case).**
- **The q-psi relationship is not monotonic, (inconsistent with statistical mechanics prediction for balanced flows)**
- **The vortex is stable, no layering observed, strain by multi-vortex interactions needed ?**

New Coriolis platform: construction

2012



poles for foundations (20 m deep)
feb. 2012



foundations platform: may 2012



storage tanks, dec 2012

2013



building finished, feb.. 2013

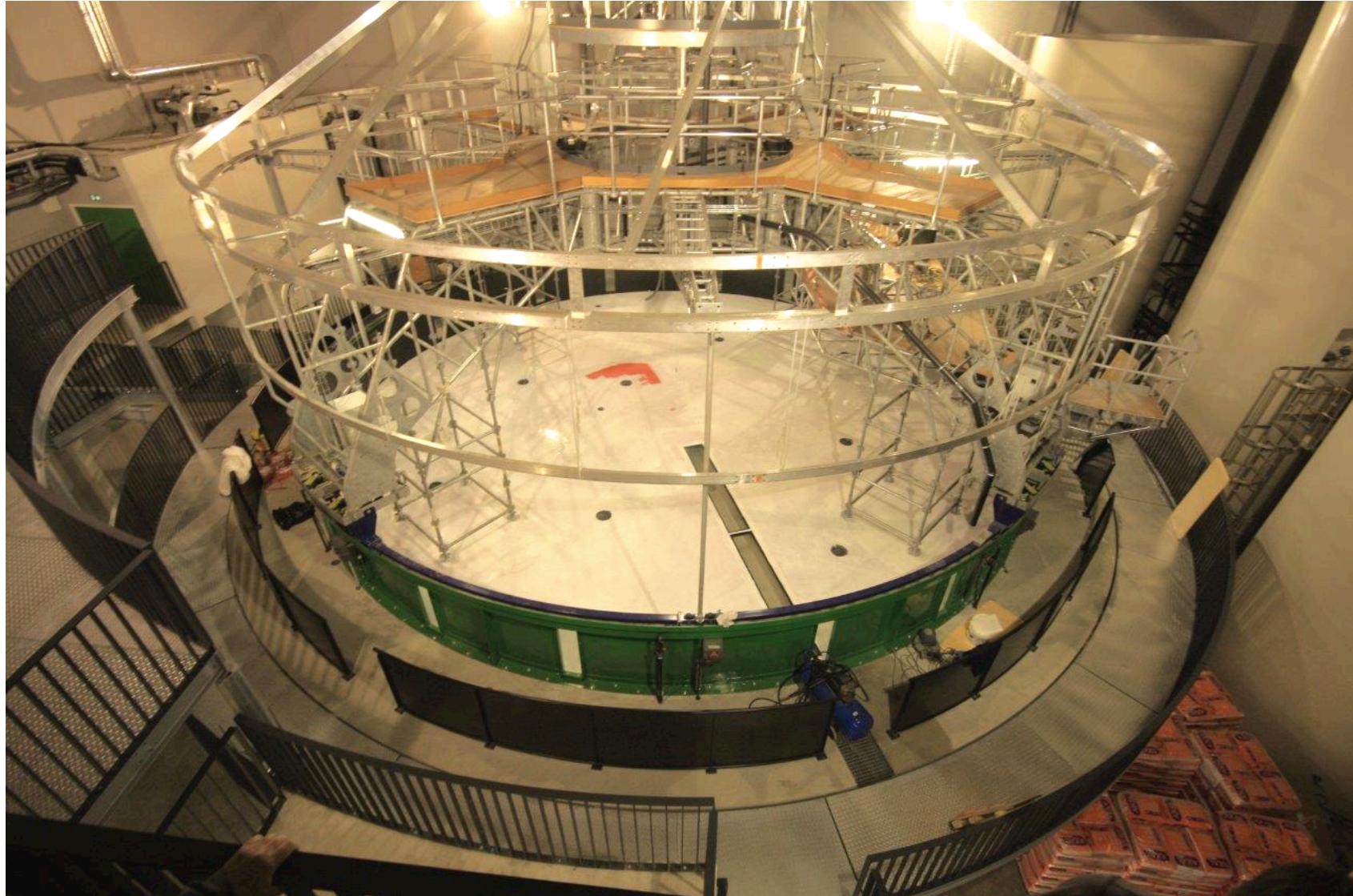


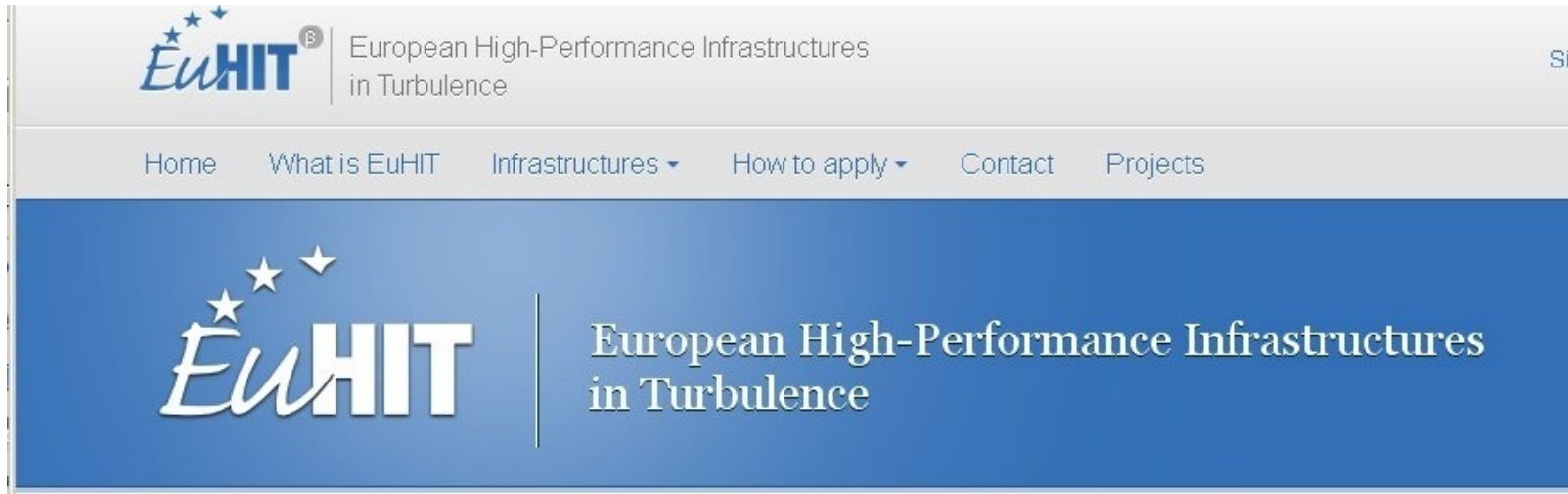
concrete molding jul. 2013



first rotation nov. 2013

New Coriolis platform (June 2014)





EuHIT : 2013-2016

3 projects planned for the Coriolis platform

Next dead-line August 4th

2 EuHIT projects planned in 2015