

COMODO: **COM**munauté de **MOD**élisation **Océanographique**:

Définition de cas tests et comparaison de modèles: des moyens pour faire progresser la simulation numérique de l'océan

Xavier COUVELARD & Anne-Marie TREGUIER (LPO IFREMER-CNRS)

Franck Dumas & Valerie Garnier (DYNECO-PHYSED)

Nicolas Ducouso (MEOM, LGGE), Francis Auclair (LA-UPS)



COMODO : *COM*unauté de *MOD*élisation *Océanique*

Projet ANR-11-MONU-005: Octobre 2011 – Septembre 2015

Responsable: Laurent Debreu

La **COM**unauté de **MOD**élisation **Océanique** Française:



•LPO – CNRS - Brest

•LEGI – CNRS – Grenoble



•LOCEAN – CNRS - Paris

•DYNECO-PHYSED – IFREMER - Brest



•EPI MOISE – INRIA - Grenoble (PI)

•LEGOS - IRD/CNRS – Toulouse



•SHOM - Brest, Toulouse

•UPS-LA – UPS/CNRS

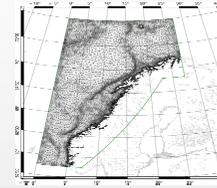
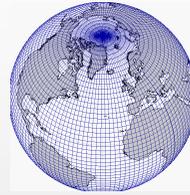
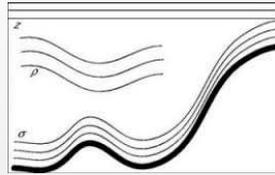


~35 Chercheurs, 5 postdocs (2 ans et plus) un ingénieur (3 ans), un PhD

Interactions avec ANR SMOC (X. Capet) & LEFE CHRONOS (F. Lemarié)

COMODO : COMunauté de MODélisation OCéanique

Les modèles de la communauté:



Model	Vertical Grid	Horizontal grid	Momentum	Tracers	External mode	Time Stepping
 Symphonie NH	Generalized+ALE	Arakawa – C curvilinear	Non hydrostatic	Upstream Third-Order	Time splitting with explicit scheme for barotropic mode	Leapfrog
 NEMO*	Z /partial steps Sigma	Arakawa – C	Energy and enstrophy conservative	Second order	Implicit free surface or time splitting	Leapfrog + asselin filter
 MARS*	Sigma	Arakawa – C	Third order quickest	Third order (horizontal) and fifth order compact (vertical)	Mode splitting with implicit scheme for barotropic mode	Second order
 ROMS (AGRIF)	sigma	Arakawa – C curvilinear with AGRIF refinement	Third-order horizontal advection; parabolic splines vertical advection	Third order advection with rotated diffusion; Splines or 4th order Akima vertical advection	Split-explicit time stepping with 2 nd order filter; density variation in 2D mode.	Third order LF-AM3
 HYCOM*	Generalised Hybrid based on isopycnal approach and remapping	Arakawa – C	Second or Third order	Second or Third order	Time splitting explicit schemes	Leapfrog+Asselin filter
 T-UGOm	Generalized s, ALE-compatible	Unstructure, triangles and quadrangles	Element order dependent	Element order dependent	Time splitting explicit or semi-implicit	Leapfrog

* running on Caparmor (in the scope of COMODO)

Les objectifs majeurs:

- I. Evaluer les modèles existants (définition de cas tests).**

- II. Améliorer les modèles existants.**

- III. Guider les évolutions futures des modèles océaniques.**

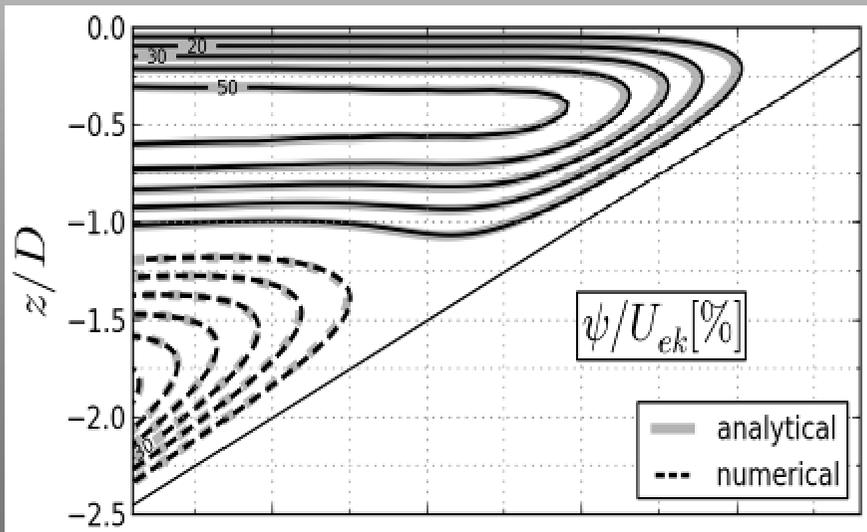
Objectif 1: Evaluer les modèles existants (définition de cas tests).

Des cas tests, dans quel but ?

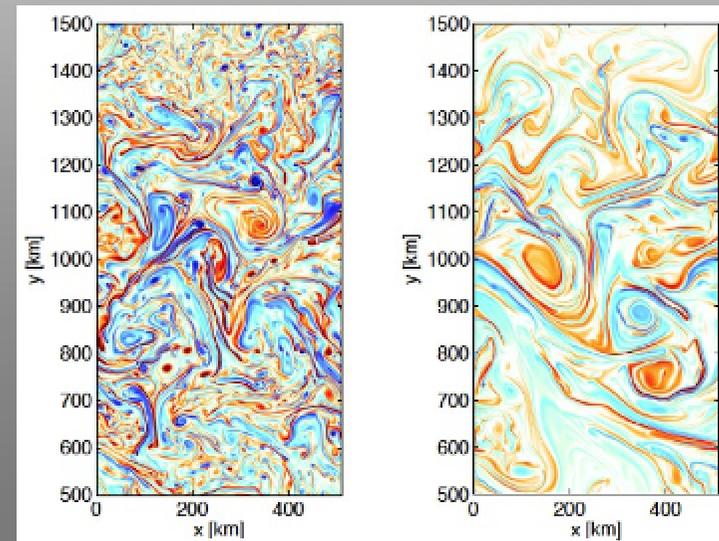
- Vérification de la physique du modèle / comparaison avec des solutions analytiques.
- Mise en évidence de problèmes -> correction de bugs = amélioration.
- Tester les nouveaux développements (suivi de version).

2 types de cas tests:

Idéalisé avec solutions analytique ou triviale Complexe (avec idée qualitative du comportement)



Cas test upwelling, fonction de courant



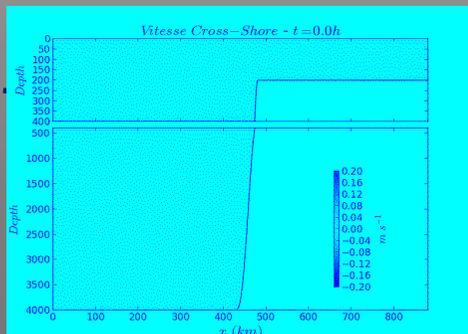
Jet Barocline, Vorticité relative

Momentum
Continuity

Trajectory of
Barotropic
vortex

Upwelling

Interaction
current-
topography



Baroclinic
vortex

Instable Jet

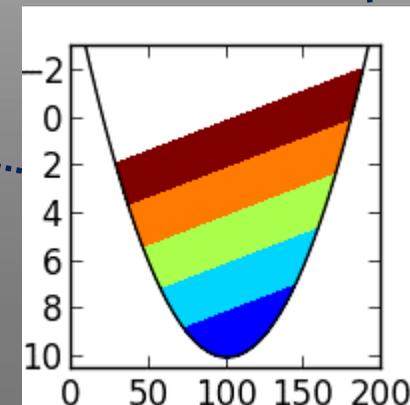
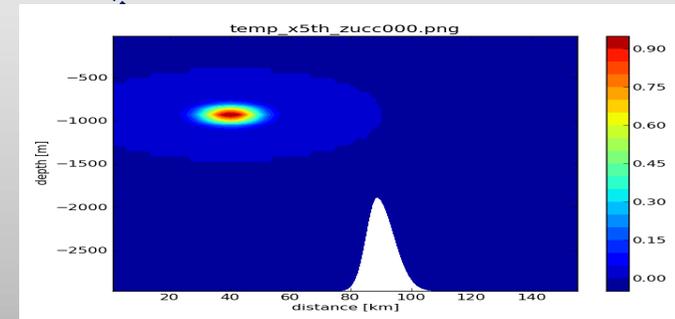
Lock
exchange

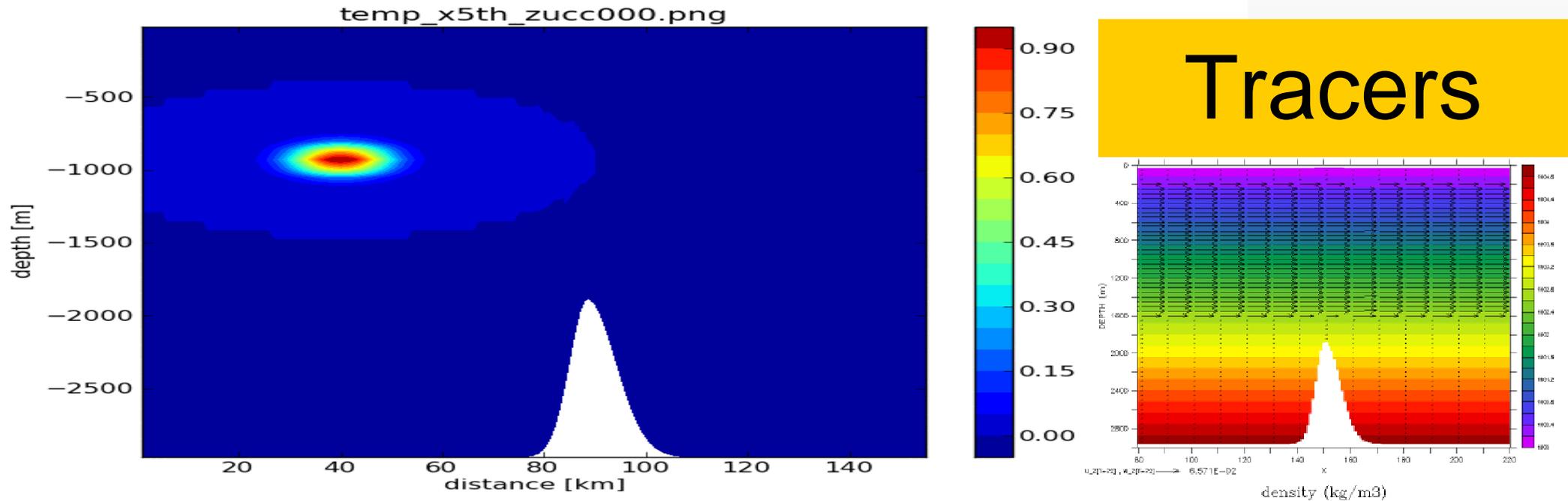
Internal wave
Thacker's bowl

Vertical
coordinates

Tracers

Transport of
passive lenses





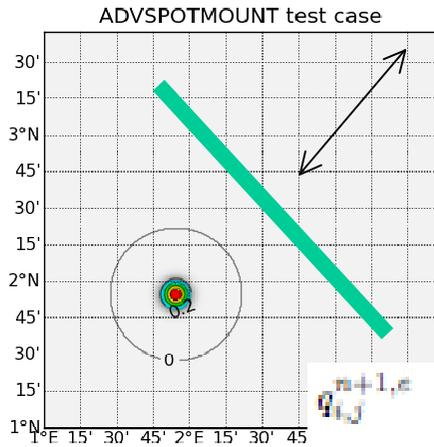
Cas test du type « sanity test-case » : généralisation en 3D des cas test de type Smolarkiewicz (1992)

Set-up :

- 2DV
- Couper l'interaction dynamique/traceurs (la dynamique est instationnaire mais prescrite via un champ non divergent de vitesse)
- Les erreurs se cumulent (Mont Asymétrique)

Objet :

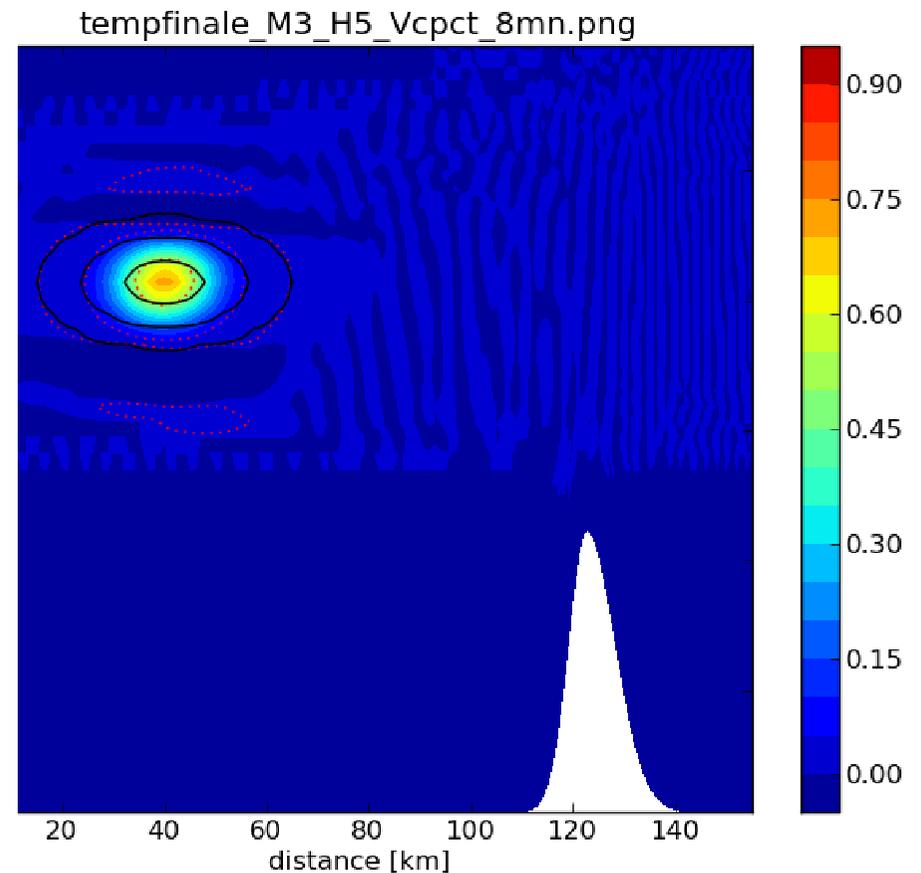
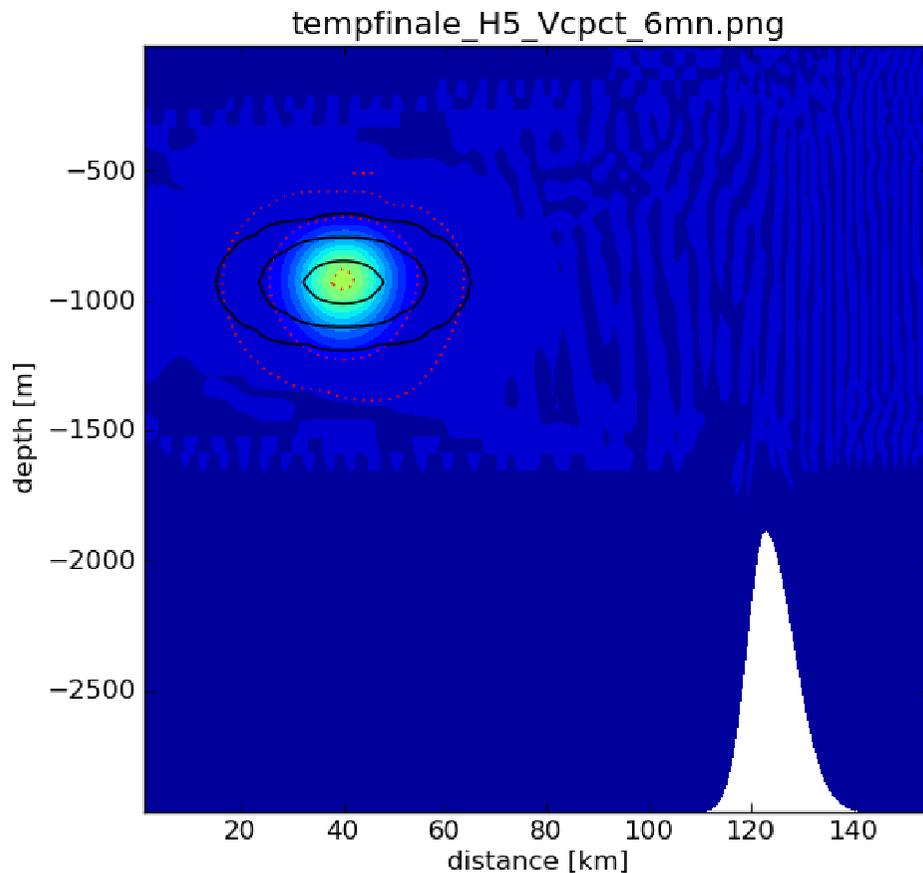
- Quantifier les erreurs diapycnale (en sigma)
- Mettre en évidence les erreurs de splitting



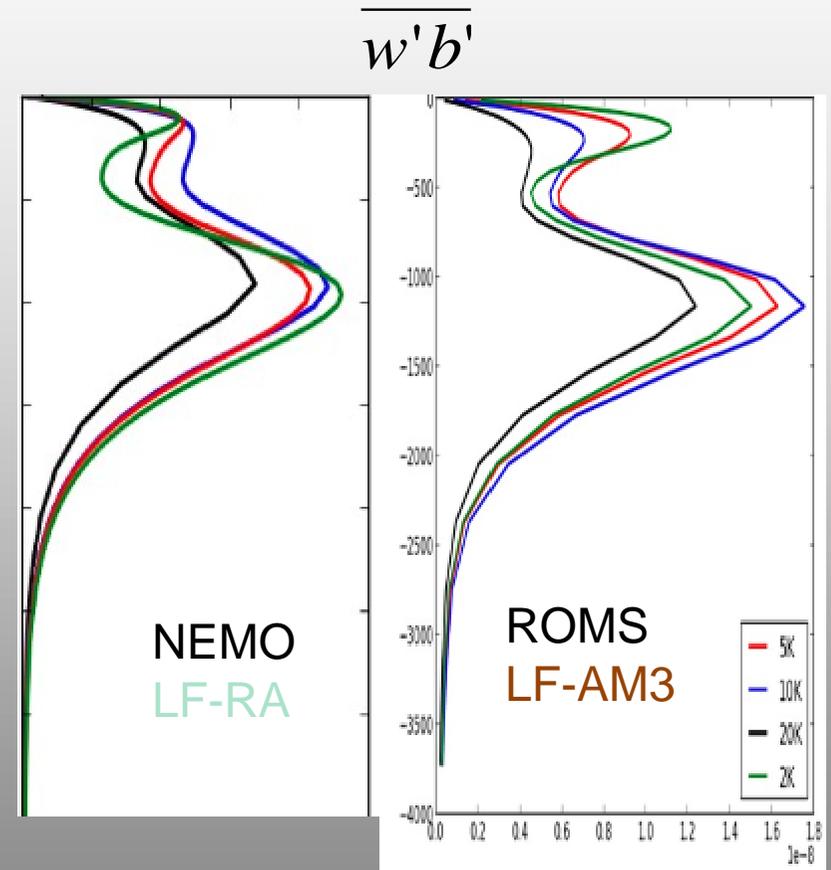
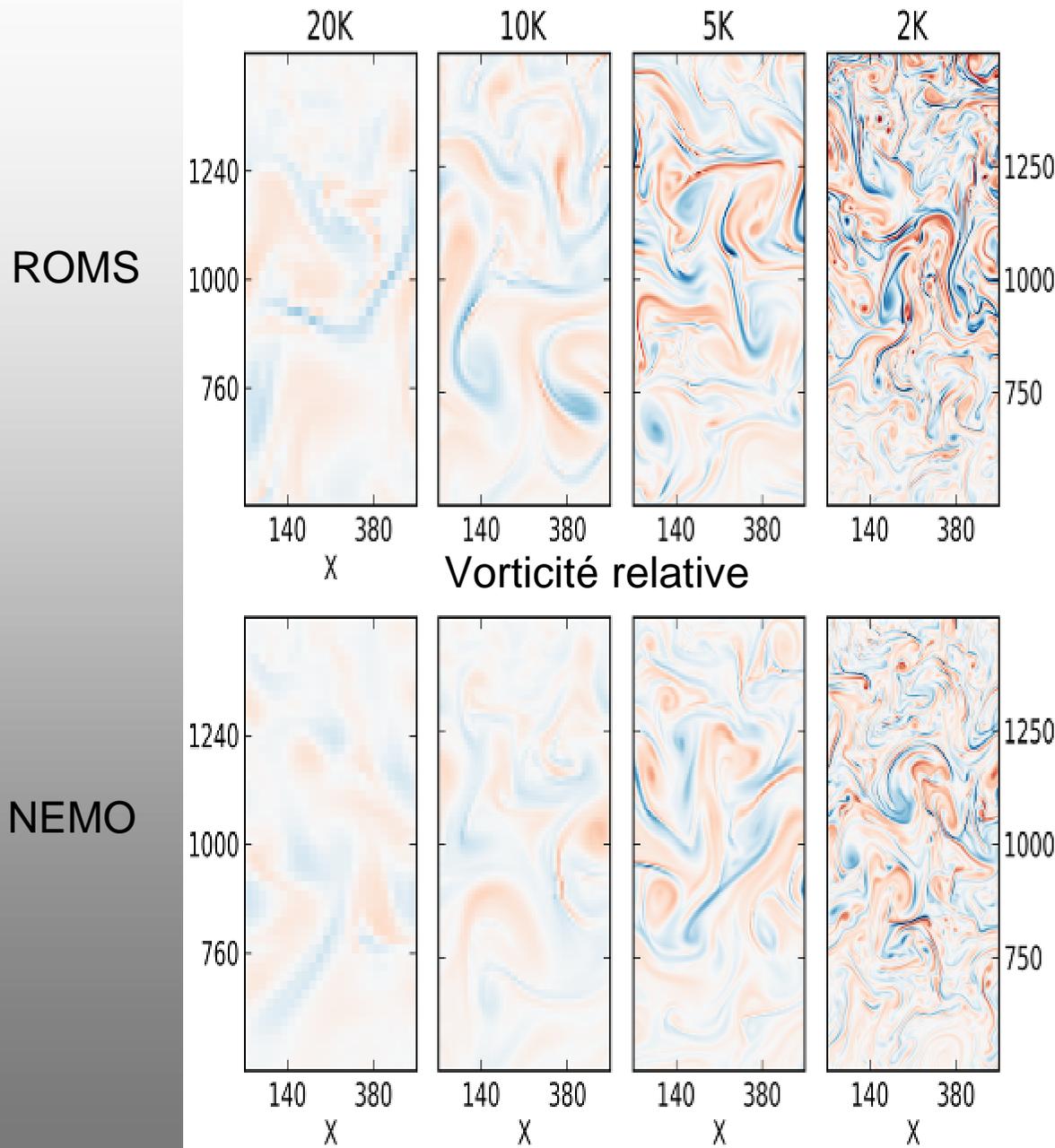
Mise en évidence de l'erreur de splitting 3D en Euler.
 Solution peu onéreuse (ie pas de surcoût mémoire comme dans les schémas multi-pas) MACHO3D pour intégrer les termes croisés

$$q_{i,j}^{n+1,c} = q_{i,j}^n - \Delta t (u \partial_x q + v \partial_y q) + \frac{1}{2} \Delta t^2 (u^2 \partial_x^2 q + 2uv \partial_x \partial_y q + v^2 \partial_y^2 q) + O(\Delta t^3)$$

Tracers



Cas tests complexes: Exemple du jet barocline, comparaison ROMS-NEMO



Turbulent energy injection

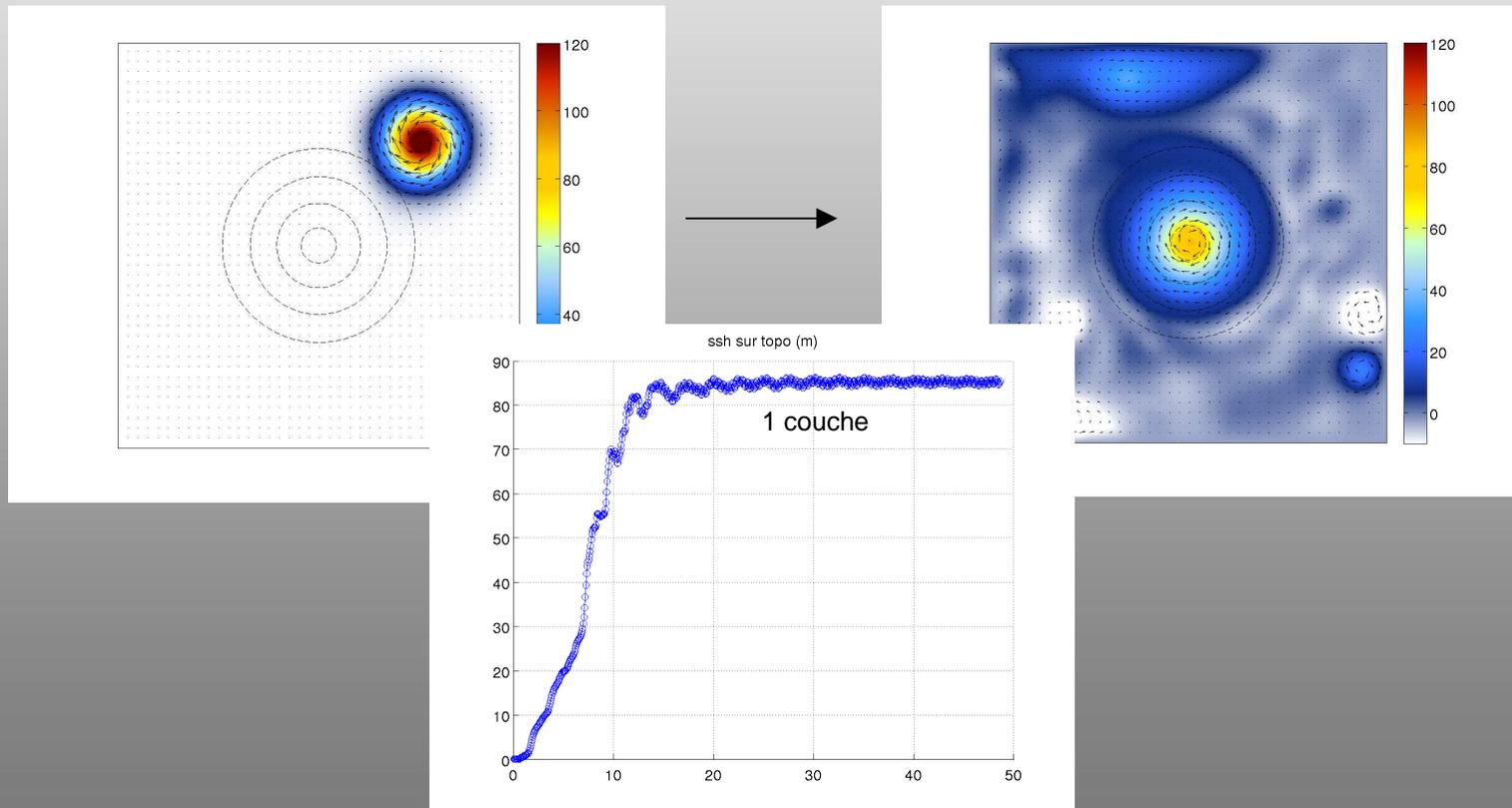
Pourquoi ces différences ?

- Schémas temporels (Souflet et al. In prep)

Objectif 2 : Améliorer les modèles existants : Exemple de l'instabilité Hollingsworth

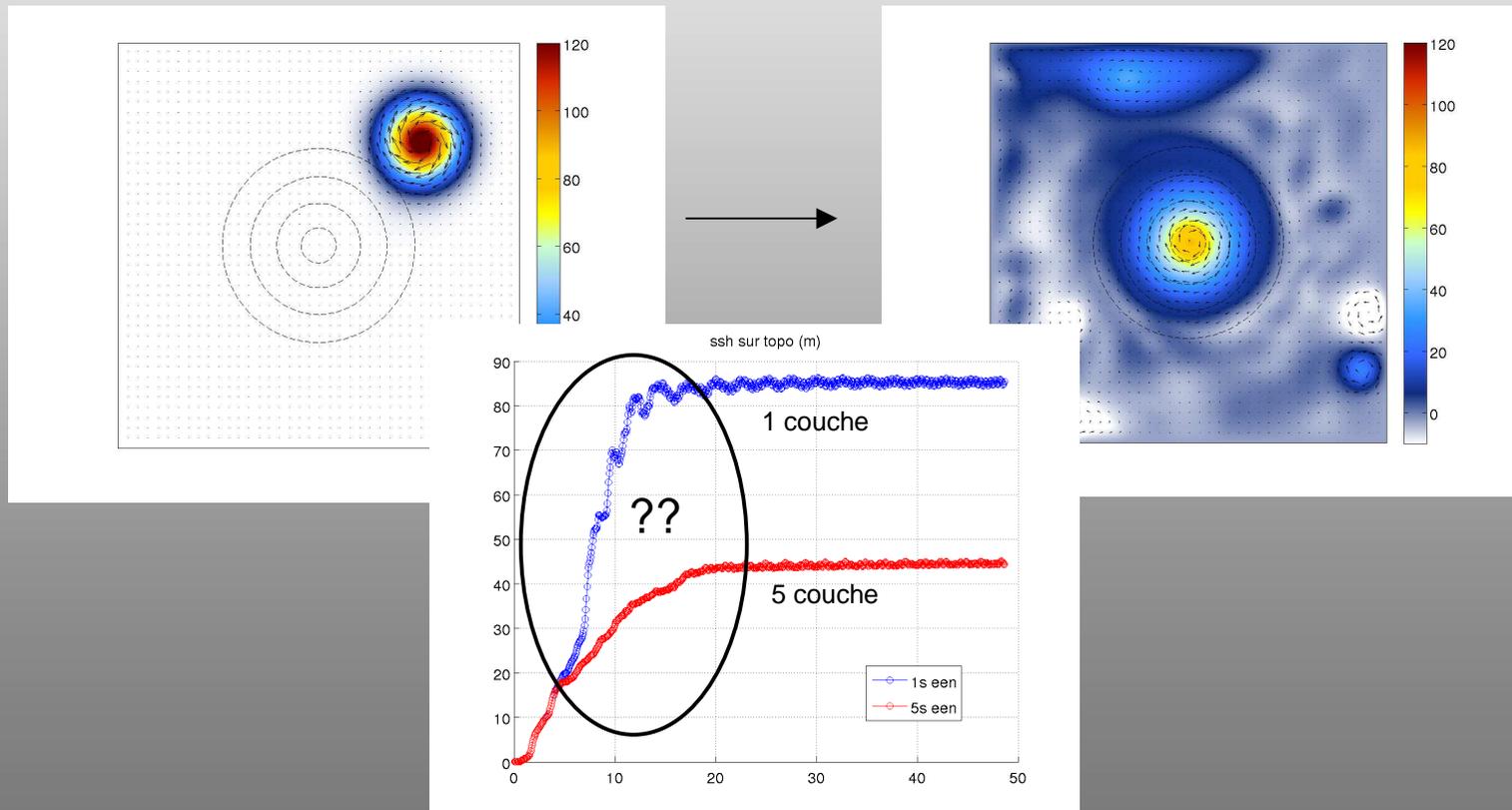
cas-test Eddy-topography interaction

Sensibilité du schéma d'avection EEN (Energy Entrophy conservation) de NEMO aux nombres de niveaux verticaux



Objectif 2 : Améliorer les modèles existants : Exemple de l'instabilité Hollingsworth cas-test Eddy-topography interaction

Sensibilité du schéma d'avection EEN (Energy Entrophy conservation) de NEMO aux nombres de niveaux verticaux



Diagnostic:

- Problème lié au développement d'une instabilité numérique: instabilité de Hollingsworth (Hollingsworth and Kallberg, 1979)
- apparaît en présence de plusieurs niveaux verticaux (z, z-ps, sigma)
- résulte de la non-annulation au niveau discret de termes croisés
- induit une non-conservation de la quantité de mouvement et des transferts d'énergies erronés

Solution:

Une correction ad-hoc via une définition 'étendue' de l'expression discrète pour l'énergie cinétique (Arakawa, 2001)

When the scheme presented here is applied to a three-dimensional model with a non-material surface vertical coordinate, linear computational instability of a meridionally propagating inertia-gravity wave can occur. Existence of such instability was first pointed out by Hollingsworth and Källberg (personal communication) of European Centre for Medium Range Forecasts. We have found that use of

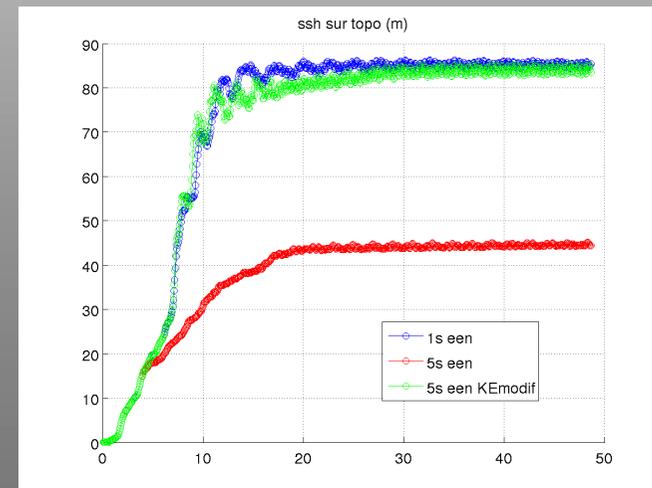
$$K_{i+1/2,j+1/2} = \frac{[1/4 u_{j+1/2}^2 + 1/16 (u_{j+3/2} + u_{j-1/2})^2]_{i+1/2}}{+ \frac{[1/4 v_{i+1/2}^2 + 1/16 (v_{i+3/2} + v_{i-1/2})^2]_{j+1/2}}$$

instead of

$$K_{i+1/2,j+1/2} = (\frac{1}{2} u^2)^i + (\frac{1}{2} v^2)^j$$

practically eliminates the instability.

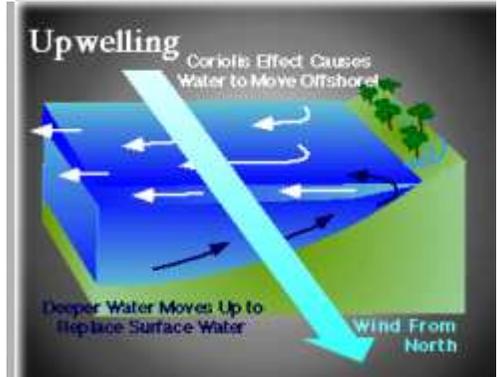
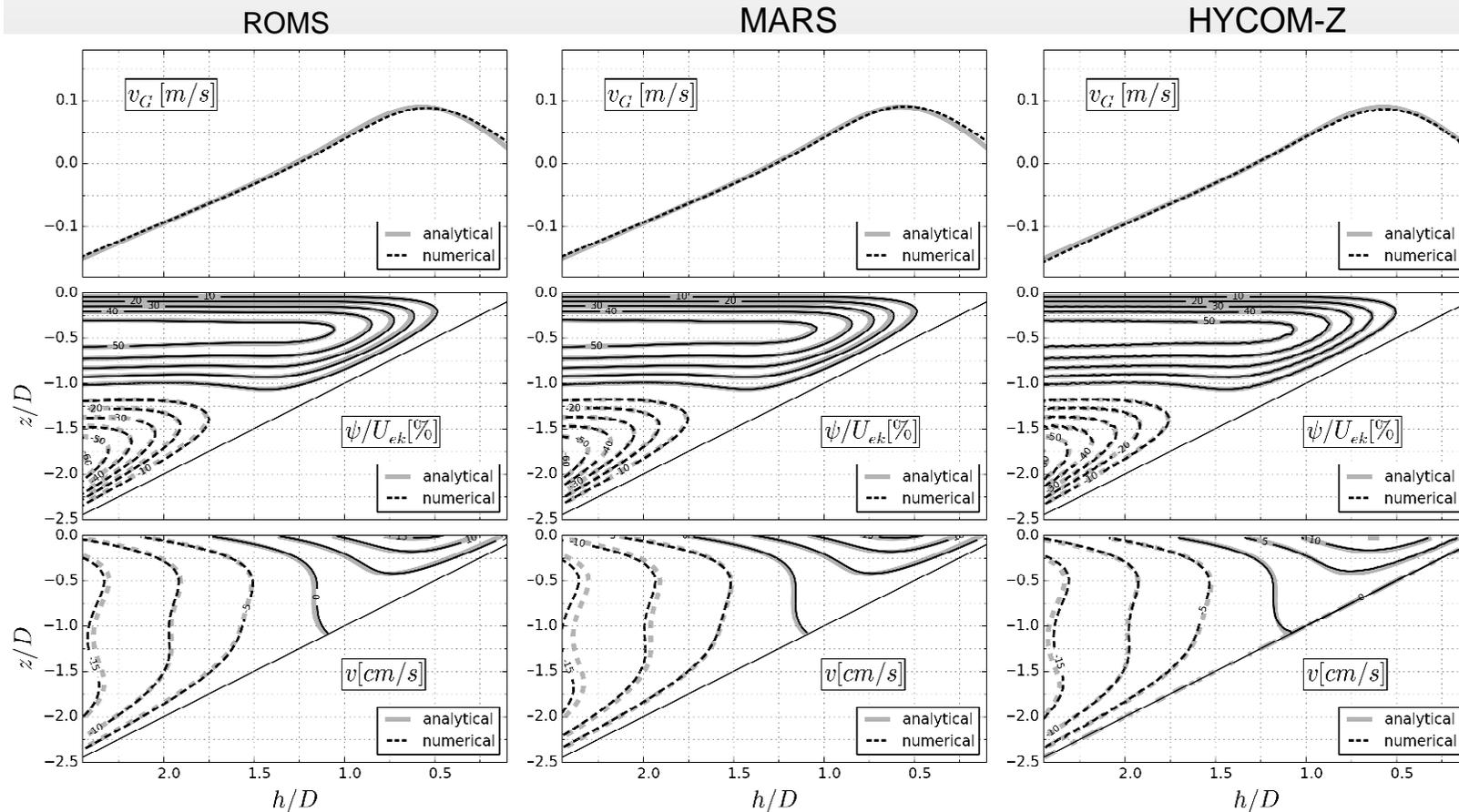
'adapted from Arakawa & Lamb 81'



Momentum Continuity

« Sanity test-case »: Upwelling (2DV)

Vertical coordinates



Hémisphère nord

Objet:

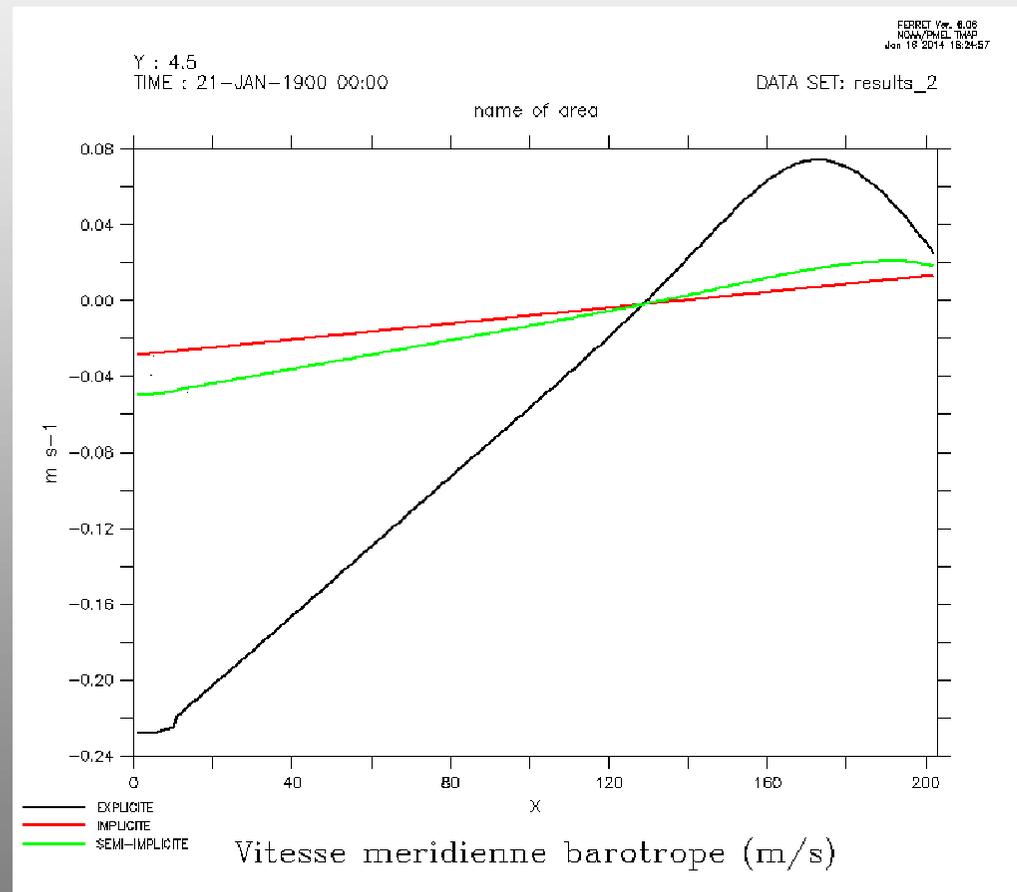
- Tester la représentation des écoulements de fonds (problématique en coordonnée Z)
- Quantifier de l'erreur faites par les modèles à coordonnée verticale non-sigma

Momentum Continuity

« Sanity test-case »: Upwelling (2DV)

Vertical coordinates

Tests de sensibilité ont montré une dépendance à l'implication du schéma temporelle

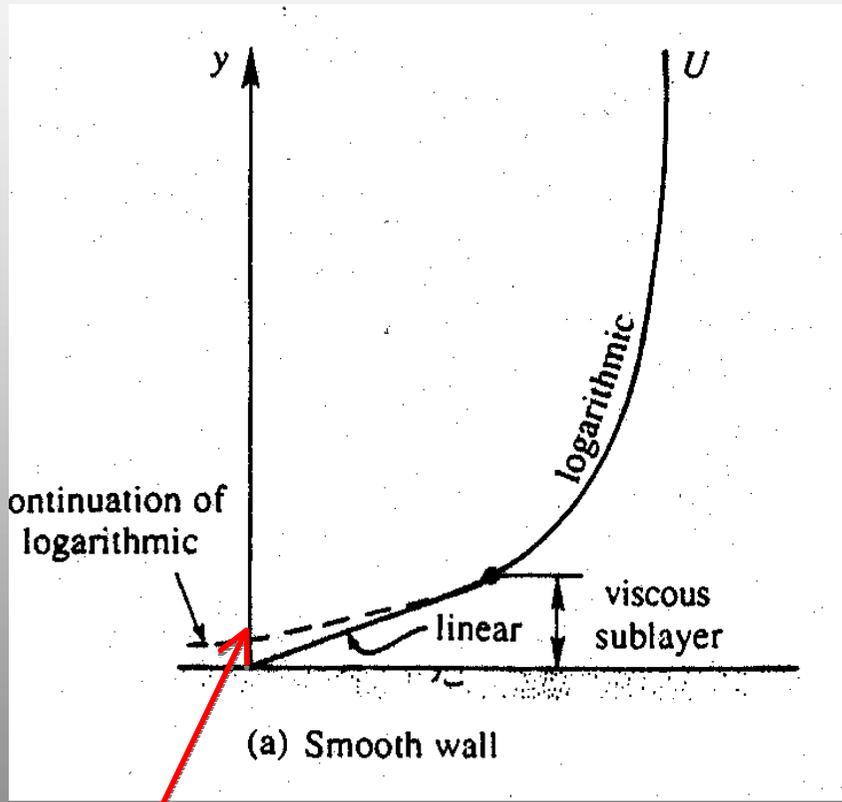


=> Modification de l'expression numérique du frottement de fond pour qu'il devienne indépendant de l'implication temporelle du schéma.

Momentum Continuity

« Sanity test-case »: Upwelling (2DV)

Vertical coordinates



3D $\tau = \rho C_d u_z^2$ (1)

$$C_d = \left(\frac{k}{\ln\left(\frac{z(1)}{z_0}\right)} \right)^2$$

2D $\tau = \rho \bar{C}_d \bar{u}^2$

$$\bar{C}_d = \left(\frac{k}{\ln\left(\frac{h}{ez_0}\right)} \right)^2$$

$k = 0.4$ Von Karman

Longueur de rugosité z_0

Inconsistance physique liée à l'implication du modèle pour le mode barotrope

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

$$\tau \propto (1 - \alpha_e) \bar{C}_d \bar{u}^{-n+1} + \alpha_e C_d \bar{u}^{-n}$$

$$\tau \propto (1 - \alpha_e) \bar{C}_d \bar{u}^{-n+1} + \alpha_e C_d \bar{u}^{-n} + (1 - \alpha_e) \bar{C}_d (u_z^n(1) - \bar{u}^{-n})$$

Objectif 3: Guider les évolutions futures des modèles océaniques.

Relaxation de l'approximation hydrostatique et d'incompressibilité
Francis Auclair, Laboratoire d'aérodynamique

Vers la création d'un noyau non-hydrostatique et d'un noyau non-Boussinesq communautaire
et le couplage entre modèles non-hydrostatiques ou non-Boussinesq et hydrostatiques

Modélisation NH

✓ Processus purement non-hydrostatiques:

- ✓ Formation d'eaux denses (cascading, convection...),
- ✓ Ondes de « petite longueur d'onde », de grande amplitude...
- ✓ Ondes solitaires,
- ✓ Instabilités, déferlement...
- ✓ Écoulements le long de pentes raides.

✓ Processus littoraux:

- ✓ Houle & interactions,
- ✓ Surcote,
- ✓ Sédimentologie / biologie,
- ✓ « Ingénierie côtière ».

✓ Vorticité horizontale: processus « non traditionnels », rouleaux...

✓ Turbulence:

- ✓ Turbulence isotrope, turbulence faible...
- ✓ Mélange induit par processus à moyenne & grande échelle,
- ✓ Cascade énergétique.

✓ Simulation physique

✓ Thématiques

- ✓ Cascades & mélange turbulent,
- ✓ Calcul HP
- ✓ Région « littorale »,
- ✓ Downscaling adaptatif...

✓ Rapprochement

- ✓ Communautés océano. ,
- ✓ Mécaniciens des fluides / turbulence.
- ✓ Modélisation atm.

Principe & Algorithmes(s),

Les « messagers de la perturbation »,...
Problématique Dynamique & Numérique.

~1500 m/s

~100 m/s

~1 m/s

Célérité

Ondes
acoustiques

Ondes de gravité
de surface

Ondes internes
de gravité

	~1500 m/s	~100 m/s	~1 m/s
Dynamique	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Anomalies P, ρ. ✓ $\vec{\nabla}P$ 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Anomalies P, ζ. ✓ $\vec{\nabla}P$: composante btrope. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Anomalies P, ρ. ✓ $\vec{\nabla}P$: composante bcline.
Modèle	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Équation d'état compressible, ✓ Continuité compressible. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ « Toit libre ». 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sel, Chaleur, Eq. d'état..
Filtrage	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Incompressibilité / Boussinesq → Résolution globale 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ « Toit rigide » → Résolution globale 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Échelles, évolution de ρ → Fermeture (turbulente)
Noyau	SNBQ	PE / SNH / SNBQ	PE / SNH / SNBQ

Schéma temporelle

SNH Time Splitting

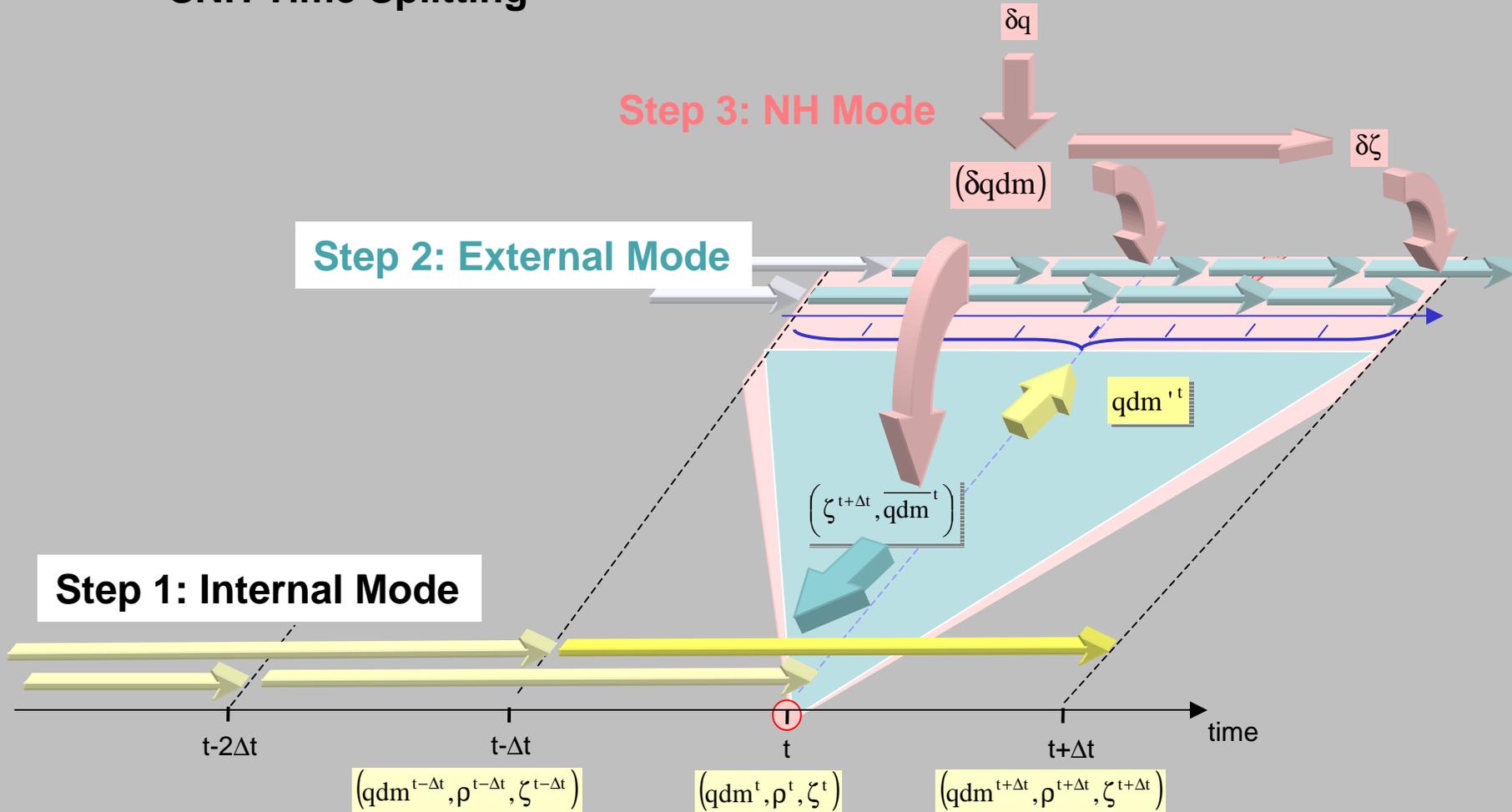


Schéma temporelle

SNBQ Time Splitting

Step 3: NBQ Mode

Step 2: External Mode

Step 1: Internal Mode

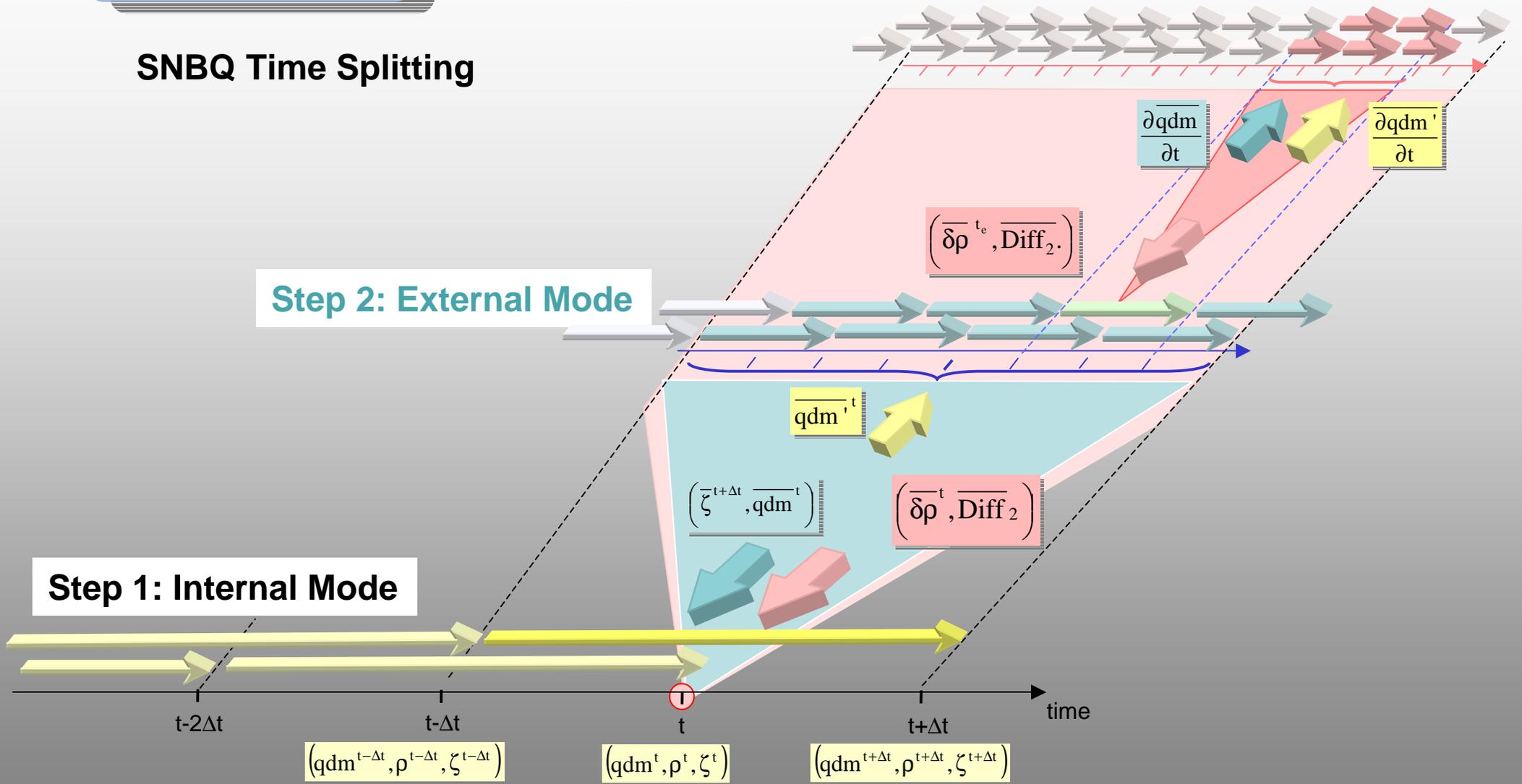
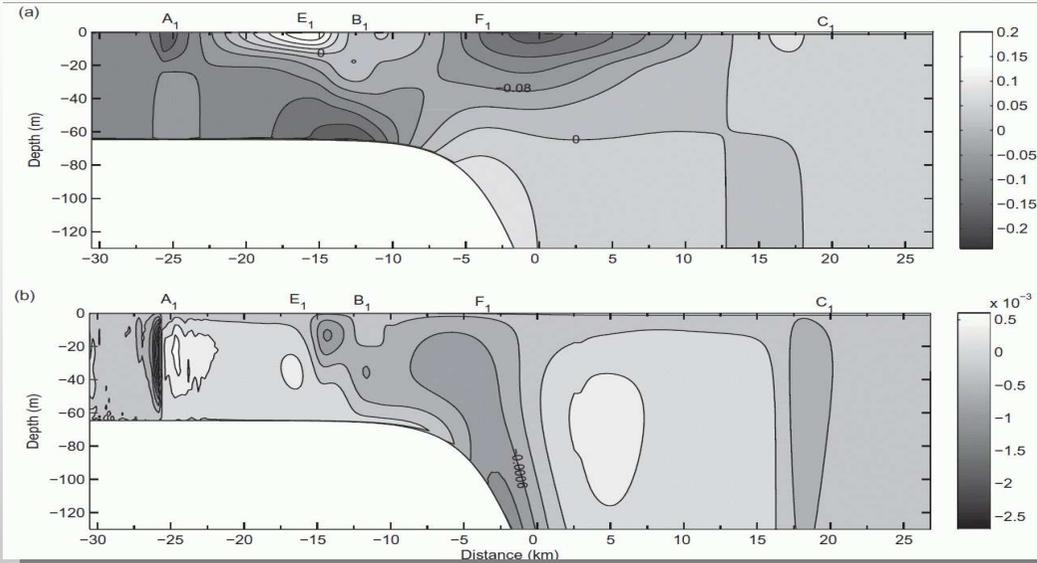


Schéma Leap-Frog en NH-NBQ

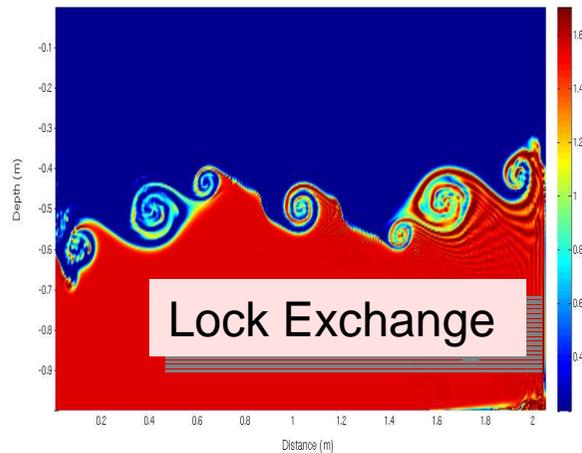
Cas test



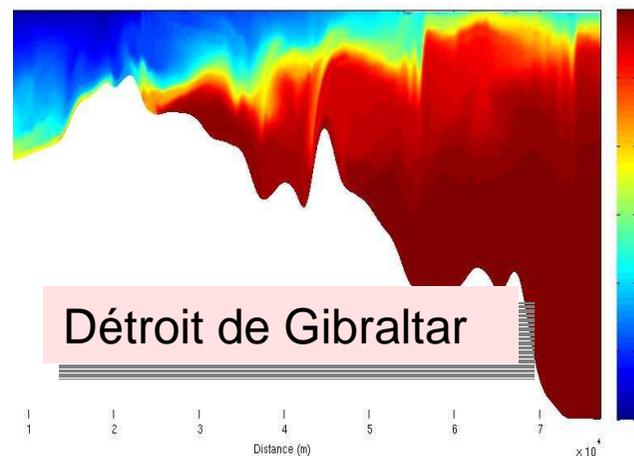
Ondes solitaires (Georges Bank)

- Cdt° limites latérales,
- Configuration 3D cyclique (Coriolis).
- Interaction marée / talus / pycnocline,
- Ondes Solitaires.

Configurations océaniques



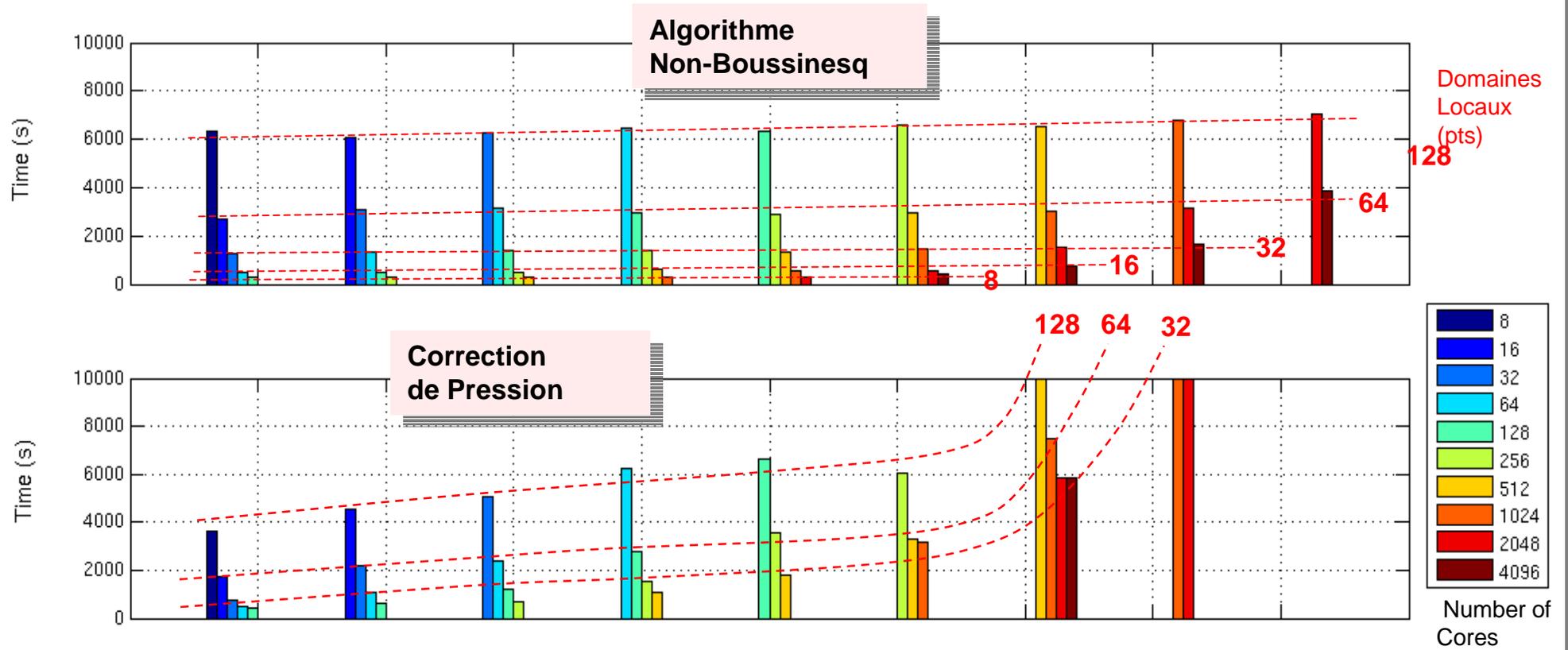
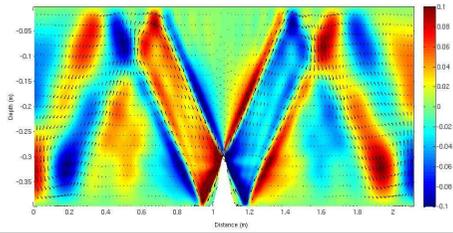
Lock Exchange



Déroit de Gibraltar

- Cdt° initiales,
- Cdt° limites latérales,
- Configuration 3D cyclique (Coriolis),
- Contrôle hydraulique,
- Interaction :
marée / talus / pycno. / courant cisailé,
- Instabilités Kelvin-Helmholtz.
- Ondes Solitaires.

Dorsale mobile



Modélisation NH

✓ Processus purement non-hydrostatiques:

- ✓ Formation d'eaux denses (cascading, convection...),
- ✓ Ondes de « petite longueur d'onde », de grande amplitude...
- ✓ Ondes solitaires,
- ✓ Instabilités, déferlement...
- ✓ Écoulements le long de pentes raides.

✓ Processus littoraux:

- ✓ Houle & interactions,
- ✓ Surcote,
- ✓ Sédimentologie / biologie,
- ✓ « Ingénierie côtière ».

✓ Vorticité horizontale: processus « non traditionnels », rouleaux...

✓ Turbulence:

- ✓ Turbulence isotrope, turbulence faible...
- ✓ Mélange induit par processus à moyenne & grande échelle,
- ✓ Cascade énergétique.

✓ Simulation physique

✓ Utilité ?

✓ Coût numérique ?

- ✓ Résolution spatio-temporelle,
- ✓ Surcoût numérique.

✓ Complexification algorithme ?

✓ Pertinence des choix numériques ?

- ✓ Grilles structurées ? Anisotropes ?
- ✓ Pas de temps multiples ?

✓ Thématiques

- ✓ Cascades & mélange turbulent,
- ✓ Calcul HP
- ✓ Région « littorale »,
- ✓ Downscaling adaptatif...

✓ Rapprochement

- ✓ Communautés océano. ,
- ✓ Mécaniciens des fluides / turbulence.
- ✓ Modélisation atm.

Prospectives récentes en modélisation océanique

- Prospective modélisation du climat et océan hauturier: prospective NEMO 2013
- Prospective océanographie opérationnelle, GMMC, 2012-2013.
- Prospective INSU, OA 2010-2011
modélisation océanographie côtière: => COMODO

Quelles implications pour les méso-centres de calcul?

Prospective NEMO

NEMO is now **facing a time of transition** : the NEMO consortium gathers more institutions; the range of applications of the code has widened (from paleoclimate to coastal); **future massively parallel computing** architectures (1M core machines) and **emerging modeling paradigms** will challenge the performance of the code.

Five objectives

- Code simplification
- Better control of energy routes
- Target effective resolution at 1km scale (hydrostatic)
- Be prepared for new grids: separate 1D processes
- Strategy for grid refinement

Prospective océanographie opérationnelle

Document disponible sur le site Mercator-ocean (recherche, GMMC)

Enjeux en hauturier et en côtier:

Couplages

- Hauturier: vagues, marées, couche limite atmosphérique, biogéochimie
- Côtier: atmosphère, bio, sédiments...

Ensembles, prévisions probabilistes

- quelles machines pour ces approches: besoin moindre de parallélisme massif?

Prospective OA-INSU

Modélisation côtière

- Numérique: résolution effective / cascades turbulentes, **explorer le potentiel de grilles non structurées** ; dynamique au-dessus des forts accidents bathymétriques ; mieux contrôler le mélange vertical (diapycnal).
- Les **couplages de modèles**: quelles implications pour les calculateurs (homogénéité, hétérogénéité)? Météorologie côtière?
- **Assimilation de données**: proximité des données et du modèle? Nouvelles données (radars HF?)

Conclusions communes (climat- côtier)

- favoriser le **développement de modules partagés entre les différents codes**, aussi bien pour les méthodes mathématiques incorporées aux modèles que pour l'évaluation des résultats ;
- mettre en place des systèmes pérennes, faisant intervenir à la fois **les groupes de modélisation et les centres de calcul** et s'inspirant du modèle des Services d'observation, pour **diffuser les résultats des simulations** numériques auprès de la communauté scientifique dans son ensemble ;

Prospective OA-INSU

Evolution des moyens de calcul: CPU et données...

L'IDRIS et l'infrastructure RENATER, qui sont d'une utilité déterminante pour le développement des recherches en Océan Atmosphère, vont donc devoir se développer en tenant compte des apports, en terme d'archivage et d'analyse des données, des centres régionaux de calcul.

Modélisation du climat:

adapter les plateformes de modélisation aux divers types de calculateurs, notamment aux machines pétaflopiques