

Sensibilité de la propagation des ondes internes au choix du type coordonnées et de la résolution verticale

Arnaud Le Boyer, Cyril Lathuilière, Annick Pichon, Flavien
Gouillon

Contexte: Projet ANR COMODO

- ▶ La modélisation a pour but de reproduire le plus précisément la circulation océanique

Contexte: Projet ANR COMODO

- ▶ La modélisation a pour but de reproduire le plus précisément la circulation océanique
- ▶ L'intégration des équations nécessitent des choix numériques :

Contexte: Projet ANR COMODO

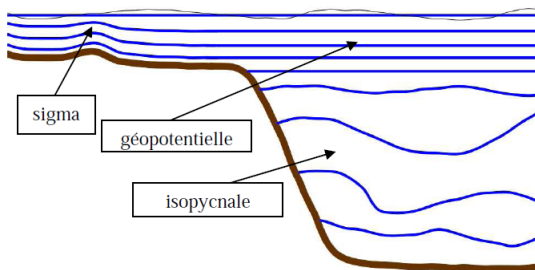
- ▶ La modélisation a pour but de reproduire le plus précisément la circulation océanique
- ▶ L'intégration des équations nécessitent des choix numériques :
 - ▶ sur les méthodes d'intégration (stabilité des schémas numériques)
 - ▶ sur la résolution (performance des calculateurs)
 - ▶ sur le système de coordonnées (grille régulière, curviligne, éléments finis ...)

Contexte: Projet ANR COMODO

- ▶ La modélisation a pour but de reproduire le plus précisément la circulation océanique
- ▶ L'intégration des équations nécessitent des choix numériques :
 - ▶ sur les méthodes d'intégration (stabilité des schémas numériques)
 - ▶ sur la résolution (performance des calculateurs)
 - ▶ sur le système de coordonnées (grille régulière, curviligne, éléments finis ...)
- ▶ L' ANR COMODO a pour but de mesurer/comprendre la sensibilité des modèles à ces différents choix

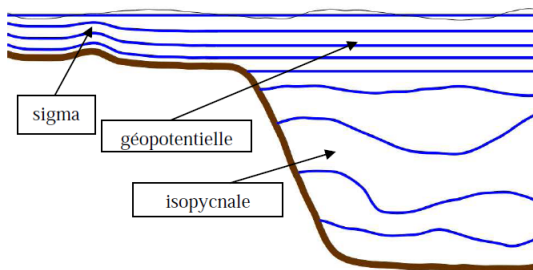
Coordonnées Verticale

La différence la plus "importante" réside dans le choix du type de coordonnées verticale.



Coordonnées Verticale

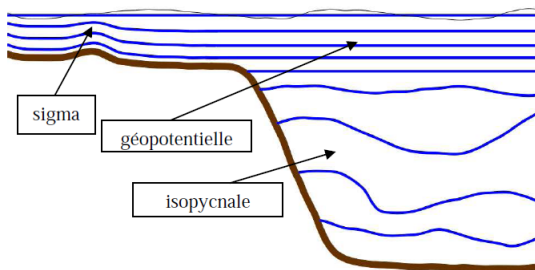
La différence la plus "importante" réside dans le choix du type de coordonnées verticale.



Les coordonnées à profondeur constante (géopotentielle ou Z),

Coordonnées Verticale

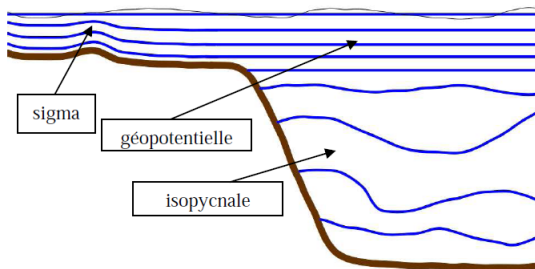
La différence la plus "importante" réside dans le choix du type de coordonnées verticale.



Les coordonnées à profondeur constante (géopotentielle ou Z), suivant la topographie (sigma)

Coordonnées Verticale

La différence la plus "importante" réside dans le choix du type de coordonnées verticale.



Les coordonnées à profondeur constante (géopotentielle ou Z), suivant la topographie (sigma) et suivant le mouvement des isopycnés (isopycnale)

Expériences: Modèle HYCOM, Coordonnée isopycnale et Z

- ▶ Largeur: 880 km
- ▶ $\Delta x = 1 \text{ km}$
- ▶ Profondeur: 4000 m to 200 m
- ▶ Durée: > 30 jours
- ▶ sortie: 30 min
- ▶ Viscosité biharmonique
- ▶ Pas de temps: 120s
- ▶ Forçage :
Marée diurne Barotrope
S2 (12h)

Diagnostics: Baroclinic Mode

A fond plat, le champ de vitesses u peut être décomposé comme la somme de modes verticaux $\psi(z)$ définis par la stratification

Diagnostics: Baroclinic Mode

A fond plat, le champ de vitesses u peut être décomposé comme la somme de modes verticaux $\psi(z)$ définis par la stratification

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{N^2(z)} \frac{d}{dz} \psi(z) \right) + \frac{1}{C_\phi^2} \psi(z) = 0 \quad (1)$$

- ▶ C_ϕ : Valeurs propres - Vitesse de Phase
- ▶ $\psi(z)$: Vecteur propres - Modes verticaux

Pour une grille à N niveaux = $N-1$ modes baroclines

Diagnostics: Baroclinic Mode

A fond plat, le champ de vitesses u peut être décomposé comme la somme de modes verticaux $\psi(z)$ définis par la stratification

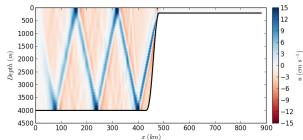
$$\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{N^2(z)} \frac{d}{dz} \psi(z) \right) + \frac{1}{C_\phi^2} \psi(z) = 0 \quad (1)$$

- ▶ C_ϕ : Valeurs propres - Vitesse de Phase
- ▶ $\psi(z)$: Vecteur propres - Modes verticaux

Pour une grille à N niveaux = $N-1$ modes baroclines

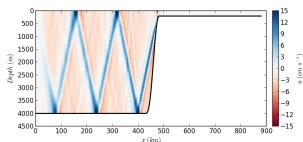
La forme des vecteurs propres est dépendante de la résolution

Stratifications différentes

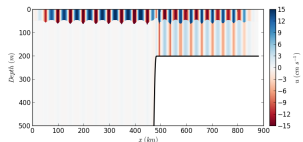


- ▶ Stratification constante: Sensibilité des modes profonds

Stratifications différentes

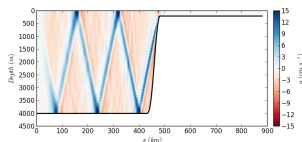


- ▶ Stratification constante: Sensibilité des modes profonds

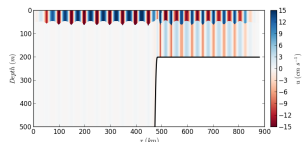


- ▶ Bi-couches: Sensibilité d'un mode interfacial (base de la thermocline)

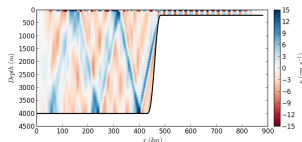
Stratifications différentes



- ▶ Stratification constante: Sensibilité des modes profonds

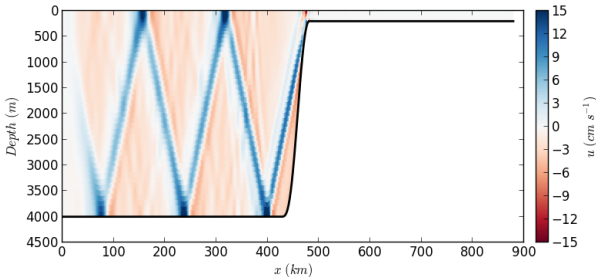


- ▶ Bi-couches: Sensibilité d'un mode interfacial (base de la thermocline)



- ▶ Interactions entre interface et modes profonds

Stratification Constante



Le mouvement peut être décomposé en une somme de modes baroclines.

Sensibilité des modes profonds

- ▶ Résolution de surface ($H_{surface}$) de 5 m d'épaisseur de couche pour les premiers 100 m
- ▶ Résolution de fond (H_{fond}) de 100 m à 300 m pour les derniers 1000 m
- ▶ $\Delta x = 1\text{km}$, longueur d'onde du mode 10 $\sim 15\text{km}$

Convergence des solutions

Vitesses du mode 5

Solution **I**sopycna**L**,**Z**

- ▶ Résolution de fond grossière: Différences dès la génération

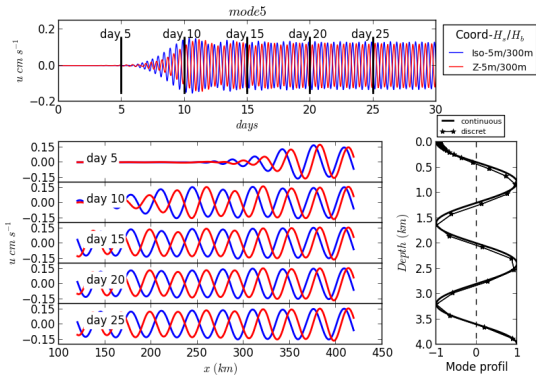


Figure: Vitesses modales: série temporelle à $x=300$ km (en haut) et leur évolution spatiale à marée haute (en bas). A droite: Profil vertical du mode 5 (Discrétisé (étoile) et continu (trait plein)). Résolution de fond :300m

Convergence des solutions

Vitesses du mode 5

Solution **I**sopycnale, **Z**

- ▶ Résolution de fond grossière: Différences dès la génération
- ▶ Fine résolution de fond: convergence entre les solutions

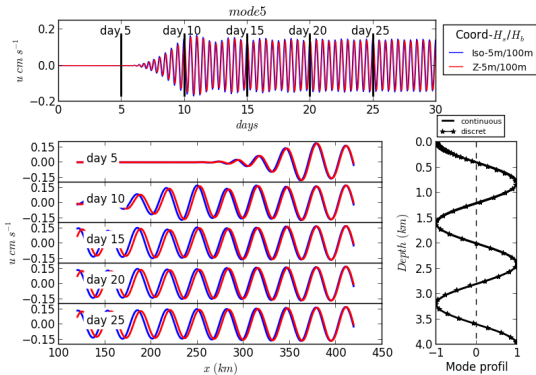


Figure: Vitesses modales: série temporelle à $x=300$ km (en haut) et leur évolution spatiale à marée haute (en bas). A droite: Profil vertical du mode 5 (Discrétisé (étoile) et continu (trait plein)). Résolution de fond :100m

Vitesses de phase

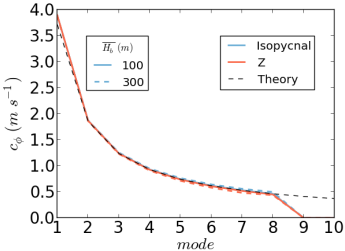
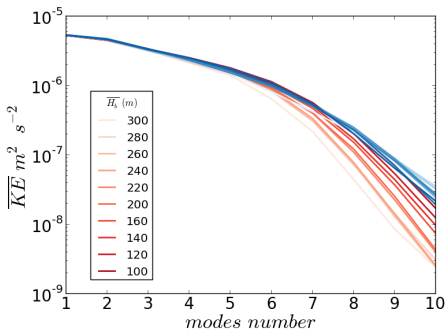


Figure: Vitesse de phase par mode barocline pour des résolutions $H_{fond}=(100,300)$ (traits pleins ,pointillés) et les coordonnées Isopycnal(bleu),Z(rouge). En noir pointillés solution analytique

Bon accord entre les vitesses de phase modélisées et la solution analytique quelque soit le type de coordonnées et la résolution.

Stratification Linéaire: Énergie cinétique

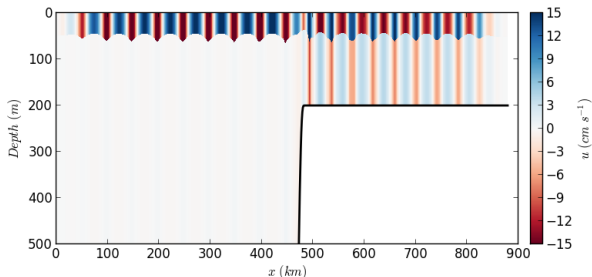


Isopycnale, Z

Figure: Énergie cinétique par mode baroclines pour des résolutions $H_{fond}=(100 \dots 300)$ (Couleurs foncées à clair) et des coordonnées isopycnales (bleu) et Z (rouge).

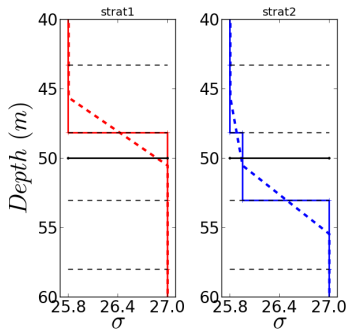
En coordonnées Z, l'amplitude des modes est dépendante de la résolution.

Forte Stratification: 2 couches



Les caractéristiques des ondes internes (i.e: mouvement) sont définies par l'épaisseur de la couche de surface h_0 et le saut de densité $\Delta\rho$.

Profil de densité



pour un $h_0 = 50m$
Strat1: Stratification binaire.
Strat 2: Stratification
interpolée

Figure: Zoom des profils de densités.

Choix: préserver les gradients de densités ou interpoler la stratification pour conserver l'épaisseur de couche de surface.

Convergence des solutions

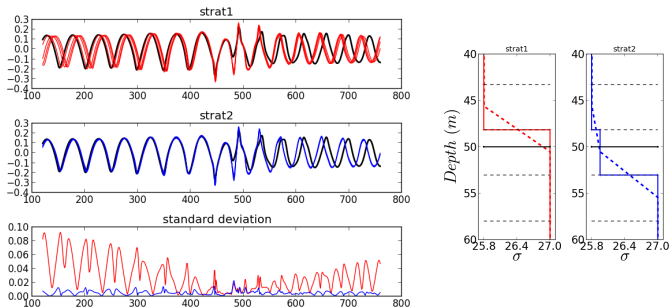


Figure: Vitesses de surface suivant x. Noir: **Solution isopycnale**.

Une stratification corrigée fait converger les solution Z entre elles et la solution isopycnale sur la plaine. Sur le plateau, les effets non linéaires forcent des différences entre la solution isopycnale et celle en Z.

Évolution de la stratification

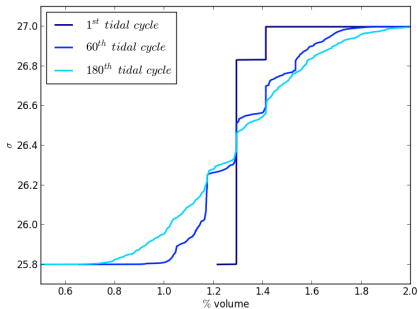


Figure: Évolution de la stratification. Pourcentage de volume d'eau à une densité donnée par rapport au volume total

La coordonnée Z lisse la stratification.

Évolution de la stratification

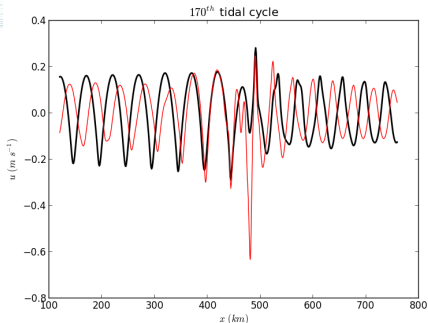
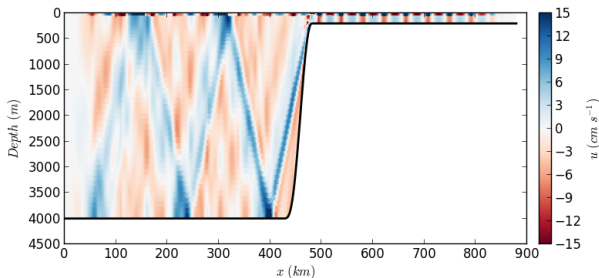


Figure: Vitesses de surface après 170 cycle de marée (85 jours). Black: Solution isopycnale. Red: Solution en Z

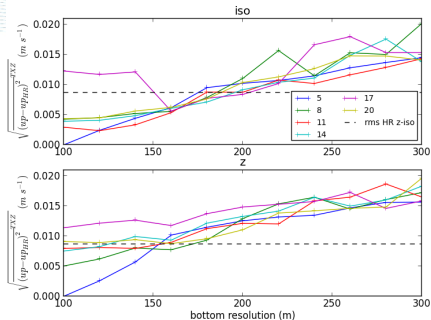
L'évolution de la stratification transforme le champs d'onde interne

Interface et modes profonds



Mouvement complexe avec interaction entre l'interface et les modes profonds

Performance entre coordonnées Z et isopycnales



► Coordonées Isopycnales

► Coordonnées Z

Figure: Écart rms avec la solution de plus fine résolution pour un système de coordonnées: Isopycnales (en haut) and Z (en bas). Le trait noir pointillé est l'écart entre les solutions les plus fines des 2 systèmes.

Des épaisseurs de couches au fond < 150 m permettent aux systèmes de coordonnées de modéliser des solutions similaires.

Conclusion

▶ Resolution

- ▶ Des stratifications fortes nécessitent des grilles verticales très précises ou d'adapter la stratification
- ▶ Pour une même qualité, les coordonnées isopycnales nécessitent moins de niveaux verticaux

▶ Systèmes de Coordonnées

- ▶ Les coordonnées Z transforment artificiellement la stratification.
- ▶ Les systèmes de coordonnées gèrent les effets non linéaires différemment: cela implique des décalages de phase et des longueurs d'ondes qui varient selon les choix numériques



MERCI

Arnaud Le Boyer, Cyril Lathuilière, Annick Pichon, Flaviën Gouillon



CAPARMOR 2015