

Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Directeur de thèse : Chantal STAQUET

14 Novembre 2008

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses

- 1 Introduction
 - Motivation
 - Marée interne
 - Réflexion des ondes internes
- 2 Etude numérique
 - Paramètres
 - Résultats
 - Conclusions
- 3 Dispositif expérimental
 - Plate-forme CORIOLIS
 - Profils de densité
 - Méthode de visualisation (PIV)
- 4 Résultats
 - Structure du champ d'ondes internes
 - Forçage de faible amplitude
 - Augmentation de l'amplitude de forçage
 - Influence de la rotation
- 5 Conclusions et perspectives

Schéma des transferts de l'énergie des ondes internes

Important pour le mélange, climat et déplacement de nourriture (Garrett, 2003b)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Motivation

Marée interne

Réflexion des ondes internes

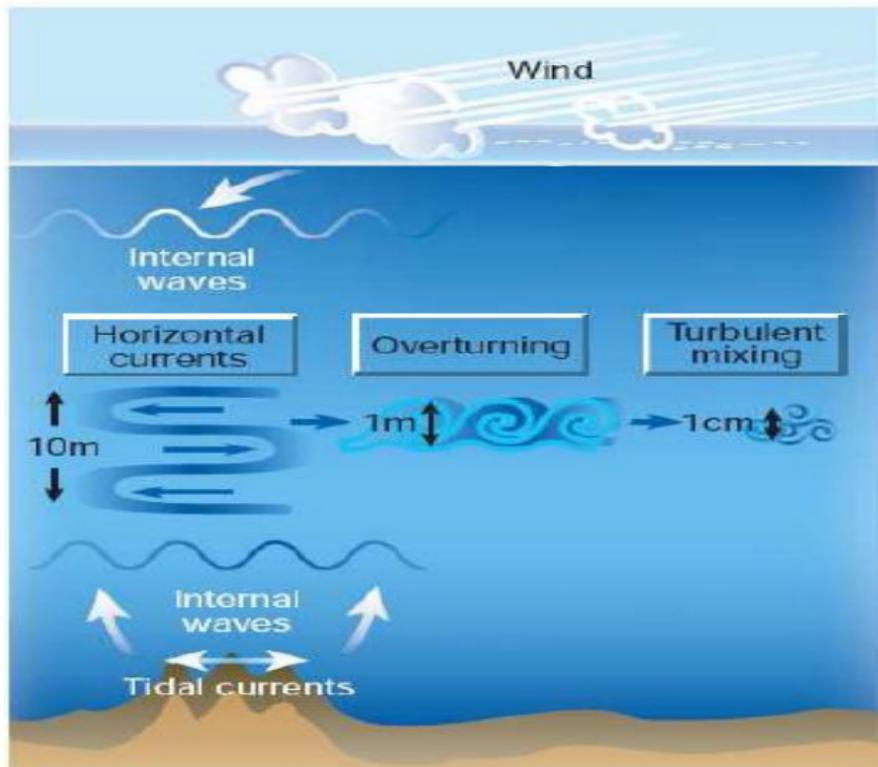
Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Effets des ondes internes en surface générés par la rivière de Columbia

Changement de couleur et riche en nourriture

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Motivation

Marée interne

Réflexion des ondes internes

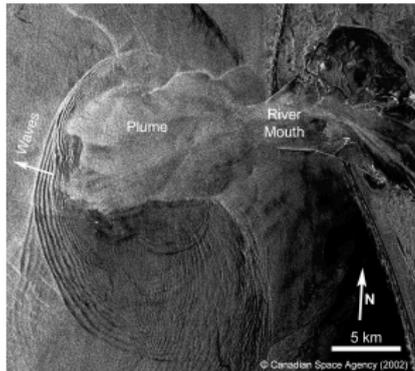
Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Effets des ondes internes en surface

Détroit de Gibraltar (ERS-1 SAR image acquired on 1 January 1993 at 22 :39 UTC)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Motivation

Marée interne

Réflexion des ondes internes

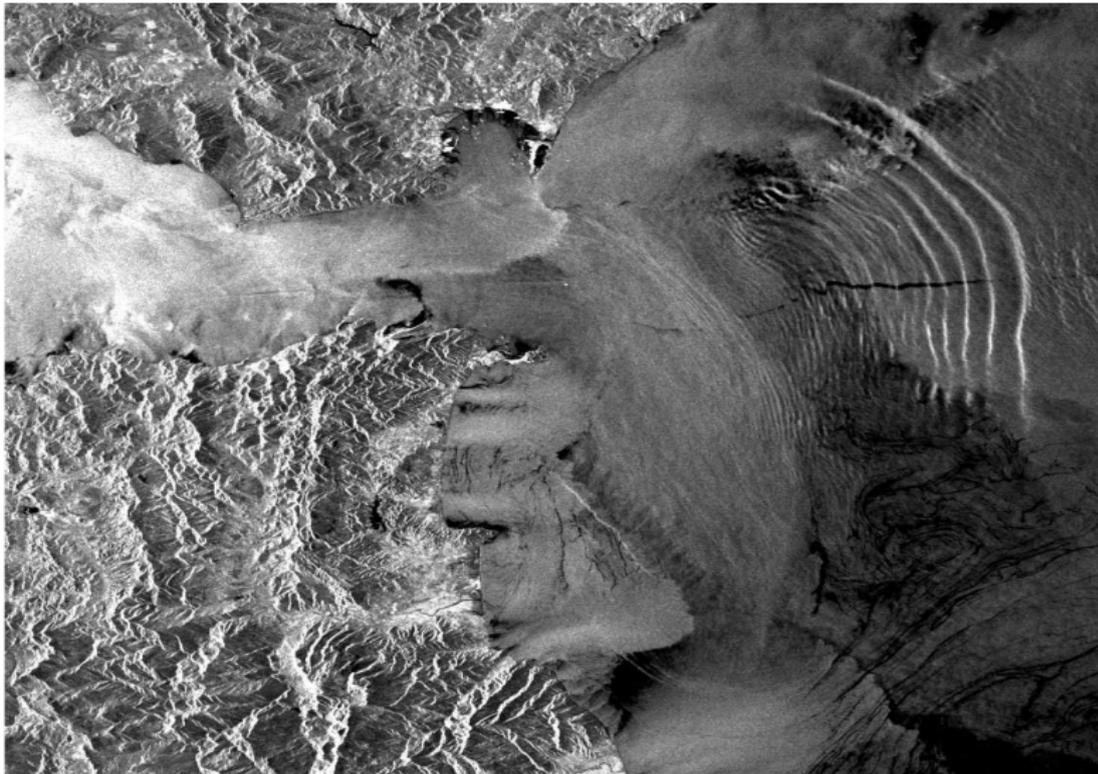
Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Densité et la fréquence de Brunt-Väisälä

Détroit de Gibraltar

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Motivation

Marée interne

Réflexion des ondes internes

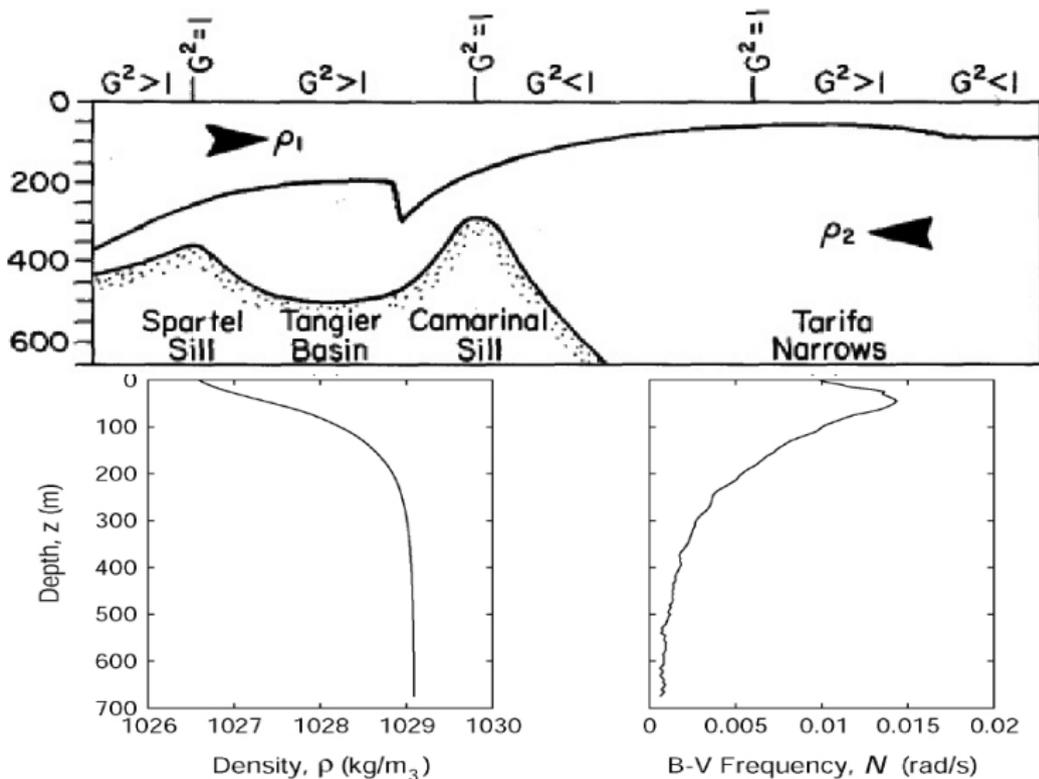
Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Les ondes internes

Les marées internes

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Motivation

Marée Interne

Réflexion des ondes internes

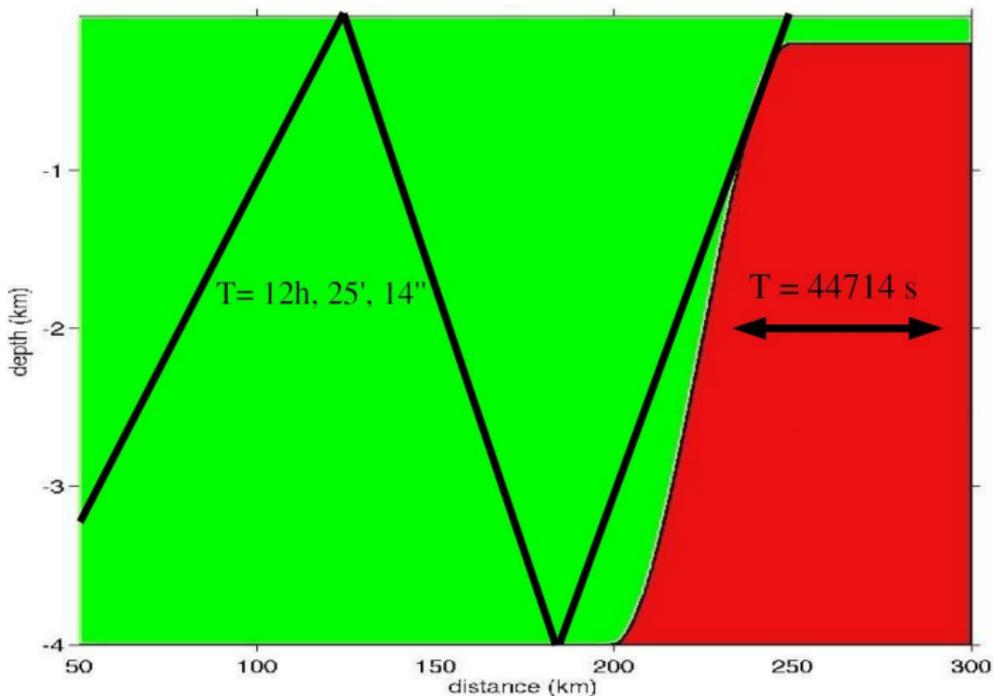
Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



On se place dans un référentiel attaché au fluide en mouvement : le talus continental devient une source oscillante.

Les ondes internes

Generation des ondes internes par un objet oscillant

Propagation et

 réflexion de la

 marée interne:

 une étude

 numérique et

 expérimentale.

Mahdi

 MOHAMMAD

 MAHDIZADEH

Introduction

Motivation

Marée interne

Réflexion des ondes

 internes

Etude numérique

Dispositif

 expérimental

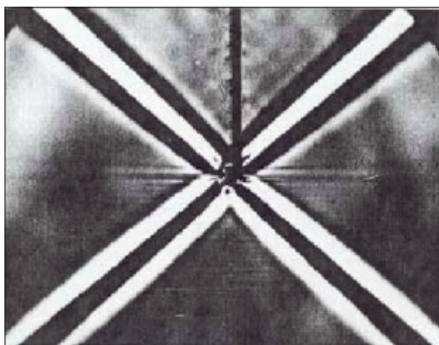
Résultats

Conclusions et

 perspectives

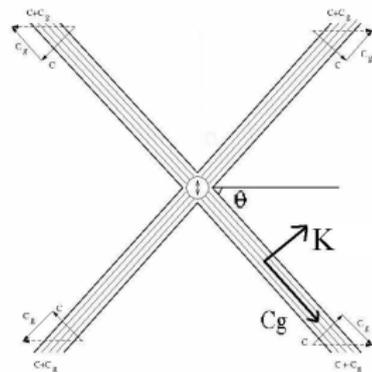
Questions-

 Réponses



Croix de St André dans un fluide stratifié

 pour $\omega/N = 0.7$ [Akylas T.R., Mei C.C., 2004.]



Vecteur d'onde et vitesse de phase et vitesse de

 groupe (adapté de [Akylas T.R., Mei C.C., 2004.])

Les ondes internes

Generation des ondes internes par un objet oscillant

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Motivation

Marée interne

Réflexion des ondes internes

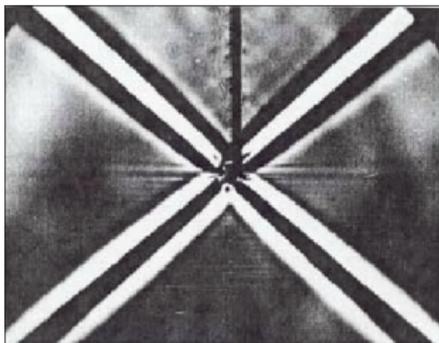
Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

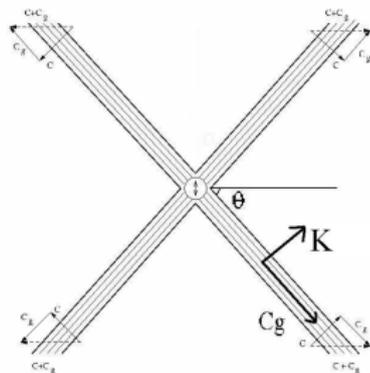
Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Croix de St André dans un fluide stratifié

pour $\omega/N = 0.7$ [Akylas T.R., Mei C.C., 2004.]

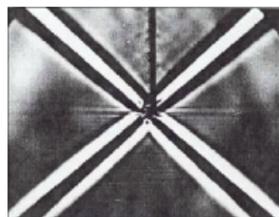


Vecteur d'onde et vitesse de phase et vitesse de groupe (adapté de [Akylas T.R., Mei C.C., 2004.])

Relation de dispersion :

sans rotation : $\omega^2 = N^2 \sin^2 \theta ;$

$$N = \sqrt{\frac{-g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$$



Croix de St André dans un fluide stratifié
pour $\omega/N = 0.7$ [Akylas T.R., Mei C.C., 2004.]

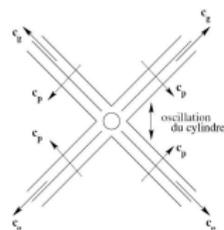


Schéma des ondes internes engendrées par un cylindre oscillant.

Relation de dispersion :

sans rotation : $\omega^2 = N^2 \sin^2 \theta$; $N = \sqrt{\frac{-g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$

avec rotation : $\omega^2 = N^2 \sin^2 \theta + f^2 \cos^2 \theta \Rightarrow \theta = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{\omega^2 - f^2}{N^2 - f^2}} \right)$

Les ondes internes

Generation des ondes internes par un objet oscillant

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Motivation

Marée interne

Réflexion des ondes internes

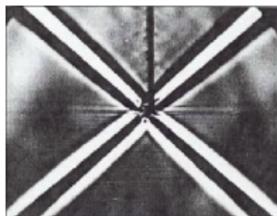
Etude numérique

Dispositif expérimental

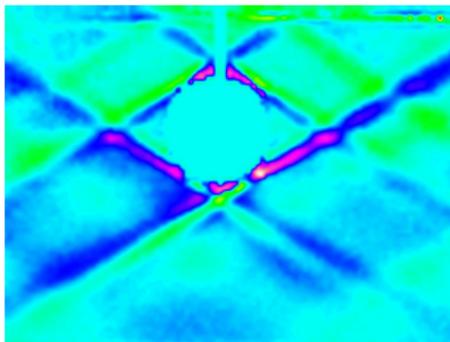
Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Croix de St André dans un fluide stratifié pour $\omega/N = 0.7$ [Akylas T.R., Mei C.C., 2004.]



Expérience [L. Gostiaux, 2006]

Influence de la taille de l'objet oscillant. [D.G. Hurley, G. Keady, 1997.]

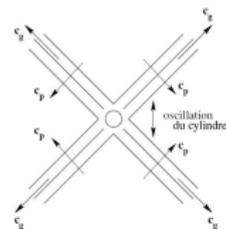
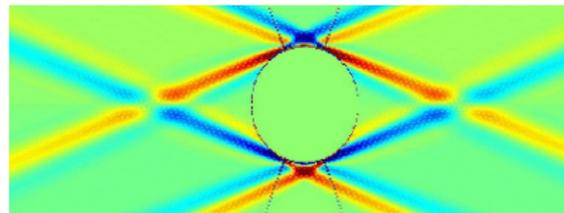


Schéma des ondes internes engendrées par un cylindre oscillant.



Théorie

Les ondes internes

Réflexion des ondes internes sur une pente

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Motivation

Marée interne

Réflexion des ondes internes

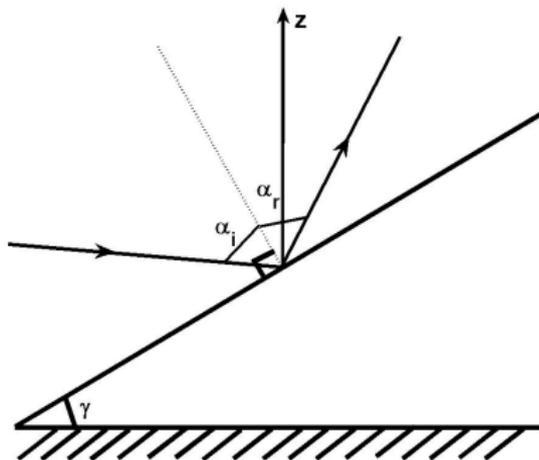
Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

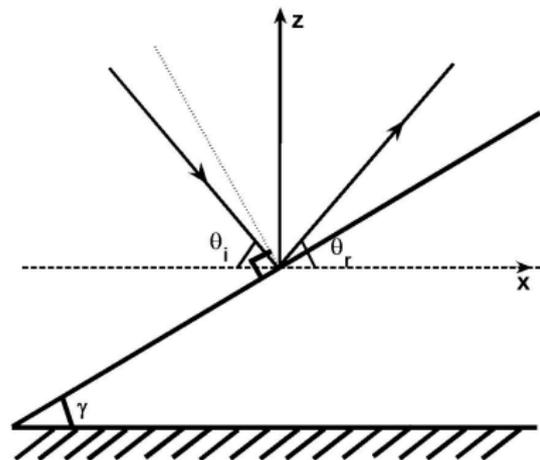
Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Ondes non-dispersives

$$\alpha_i = \alpha_r$$



Ondes internes

$$\theta_i = \theta_r$$

$$\omega_i = N \sin \theta_i; \quad \omega_r = N \sin \theta_r$$

Les ondes internes

Réflexion des ondes internes sur le talus continental

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Motivation

Marée interne

Réflexion des ondes internes

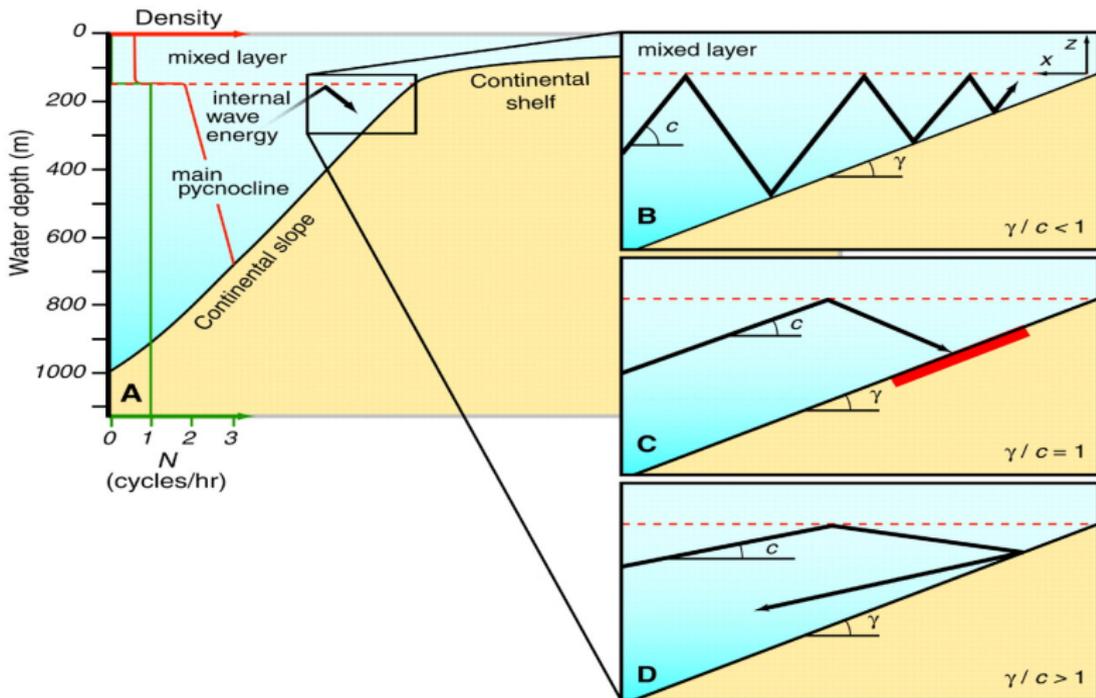
Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



(B) : pente sous-critique ($\gamma/c < 1$); (C) : pente critique ($\gamma/c = 1$), l'énergie est piégée au voisinage de la pente; (D) : super-critique ($\gamma/c > 1$). [D. A. Cacchione, C. I. Wunsch, 1974.]

Condition océanique :

● Paramètres physiques

- Talus continental idéal, forçage par la marée semi-diurne M2 ($\omega = 1.40448 \times 10^{-4} \text{ Rad/s}$)
- N constant
- Le paramètre de coriolis (f) = 0
- Profondeur de l'eau (H) = 4000 m

● Paramètres numériques

- Résolution : $\Delta x = 500 \text{ m}$; $\Delta z = 25 \text{ m}$ (calculs parallèles : $\Delta x = 100 \text{ m}$)
- Pas de temps = 22.357 s (durée du calcul : 15 périodes de marée) (calculs parallèles : 11.179 s)
- 700 de points de grille dans la direction X (calculs parallèles : 4000)
- 160 de points de grille dans la direction Z
- Viscosité horizontale $A_h = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; Viscosité verticale $A_z = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Condition océanique :

● Paramètres physiques

- Talus continental idéal, forçage par la marée semi-diurne M2 ($\omega = 1.40448 \times 10^{-4} \text{ Rad/s}$)
- N constant
- Le paramètre de coriolis (f) = 0
- Profondeur de l'eau (H) = 4000 m

● Paramètres numériques

- Résolution : $\Delta x = 500 \text{ m}$; $\Delta z = 25 \text{ m}$ (calculs parallèles : $\Delta x = 100 \text{ m}$)
- Pas de temps = 22.357 s (durée du calcul : 15 périodes de marée) (calculs parallèles : 11.179 s)
- 700 de points de grille dans la direction X (calculs parallèles : 4000)
- 160 de points de grille dans la direction Z
- Viscosité horizontale $A_h = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; Viscosité verticale $A_z = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Condition océanique :

● Paramètres physiques

- Talus continental idéal, forçage par la marée semi-diurne M2 ($\omega = 1.40448 \times 10^{-4} \text{ Rad/s}$)
- N constant
- Le paramètre de coriolis (f) = 0
- Profondeur de l'eau (H) = 4000 m

● Paramètres numériques

- Résolution : $\Delta x = 500 \text{ m}$; $\Delta z = 25 \text{ m}$ (calculs parallèles : $\Delta x = 100 \text{ m}$)
- Pas de temps = 22.357 s (durée du calcul : 15 périodes de marée) (calculs parallèles : 11.179 s)
- 700 de points de grille dans la direction X (calculs parallèles : 4000)
- 160 de points de grille dans la direction Z
- Viscosité horizontale $A_h = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; Viscosité verticale $A_z = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Condition océanique :

- Paramètres physiques

- Talus continental idéal, forçage par la marée semi-diurne M2 ($\omega = 1.40448 \times 10^{-4} \text{ Rad/s}$)
- N constant
- Le paramètre de coriolis (f) = 0
- Profondeur de l'eau (H) = 4000 m

- Paramètres numériques

- Résolution : $\Delta x = 500 \text{ m}$; $\Delta z = 25 \text{ m}$ (calculs parallèles : $\Delta x = 100 \text{ m}$)
- Pas de temps = 22.357 s (durée du calcul : 15 périodes de marée) (calculs parallèles : 11.179 s)
- 700 de points de grille dans la direction X (calculs parallèles : 4000)
- 160 de points de grille dans la direction Z
- Viscosité horizontale $A_h = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; Viscosité verticale $A_z = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Condition océanique :

- Paramètres physiques

- Talus continental idéal, forçage par la marée semi-diurne M2 ($\omega = 1.40448 \times 10^{-4} \text{ Rad/s}$)
- N constant
- Le paramètre de coriolis (f) = 0
- Profondeur de l'eau (H) = 4000 m

- Paramètres numériques

- Résolution : $\Delta x = 500 \text{ m}$; $\Delta z = 25 \text{ m}$ (calculs parallèles : $\Delta x = 100 \text{ m}$)
- Pas de temps = 22.357 s (durée du calcul : 15 périodes de marée) (calculs parallèles : 11.179 s)
- 700 de points de grille dans la direction X (calculs parallèles : 4000)
- 160 de points de grille dans la direction Z
- Viscosité horizontale $A_h = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; Viscosité verticale $A_z = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Composante (u) du champ de vitesse de la marée interne après 15 périodes

$N = 0.002 \text{ rad/s}$ ($\Delta T = 8.15^\circ \text{C}$)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Paramètres

Résultats

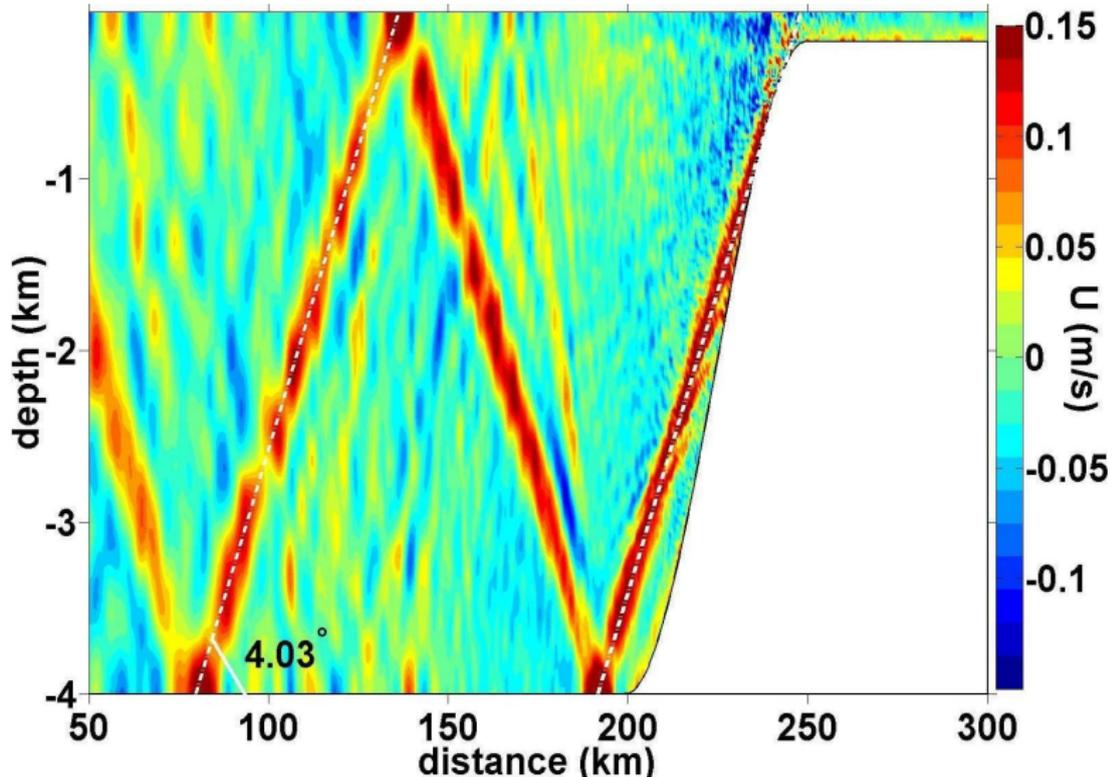
Conclusions

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Composante (u) du champ de vitesse de la marée interne après 10 périodes

$N = 0.0028 \text{ rad/s}$ ($\Delta T = 16.31^\circ\text{C}$)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Paramètres

Résultats

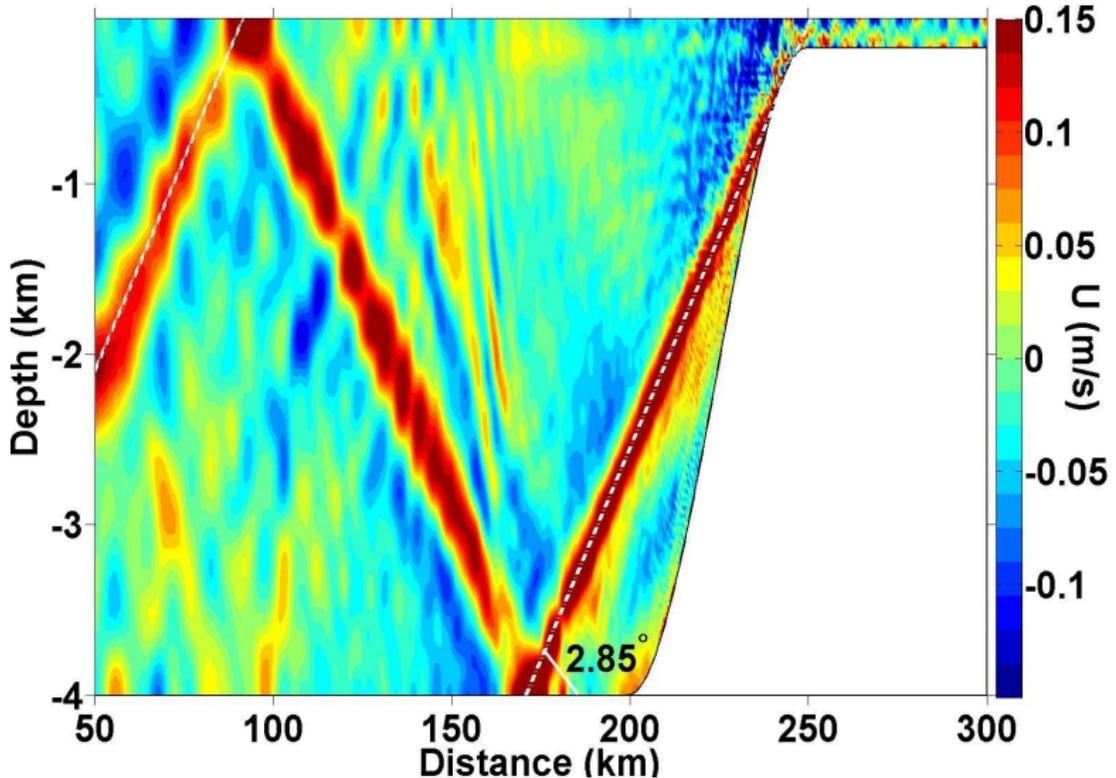
Conclusions

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Thermocline permanente choisie

Effets de la thermocline sur la propagation de la marée interne

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Paramètres

Résultats

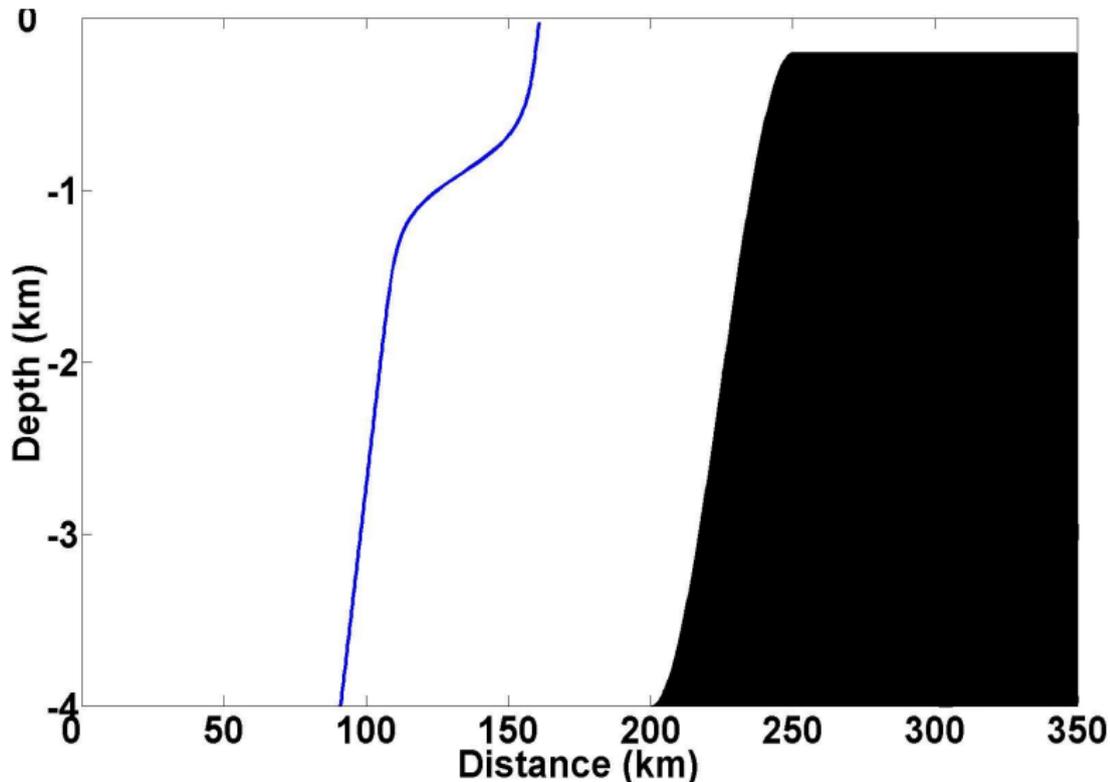
Conclusions

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Thermocline permanente choisie

Effets de la thermocline sur la propagation de la marée interne

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Étude numérique

Paramètres

Résultats

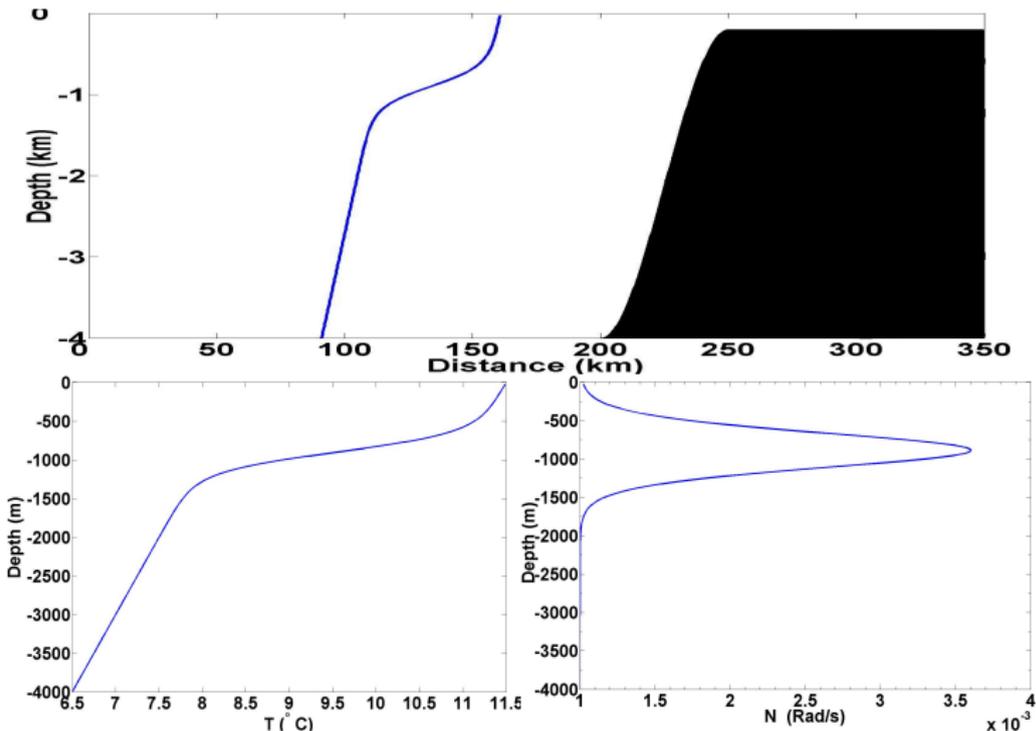
Conclusions

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Composante (u) du Champ de vitesse de la marée interne après 15 périodes

et comparaison avec le cas N constant pour le même ΔT ; $\Delta T = 5^\circ \text{C}$ (ligne pointillée)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Paramètres

Résultats

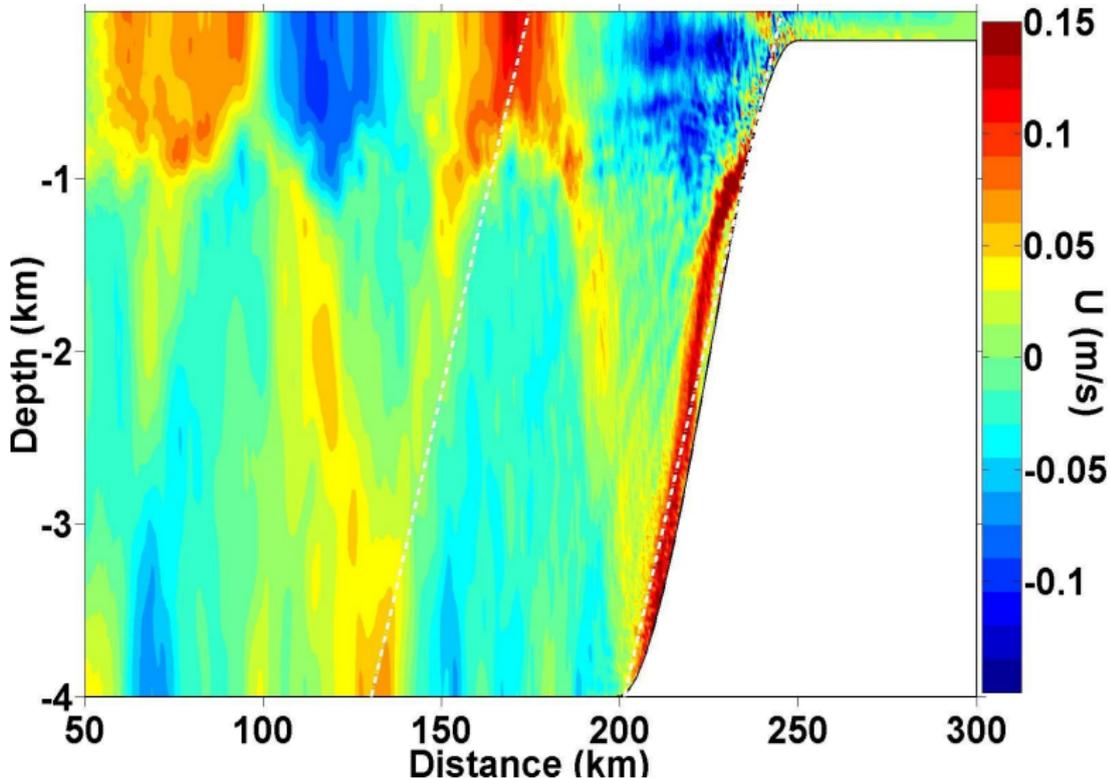
Conclusions

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Composante (w) du Champ de vitesse de la marée interne après 15 périodes

en présence d'une thermocline peu marquée; $\Delta T = 5^\circ\text{C}$

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Étude numérique

Paramètres

Résultats

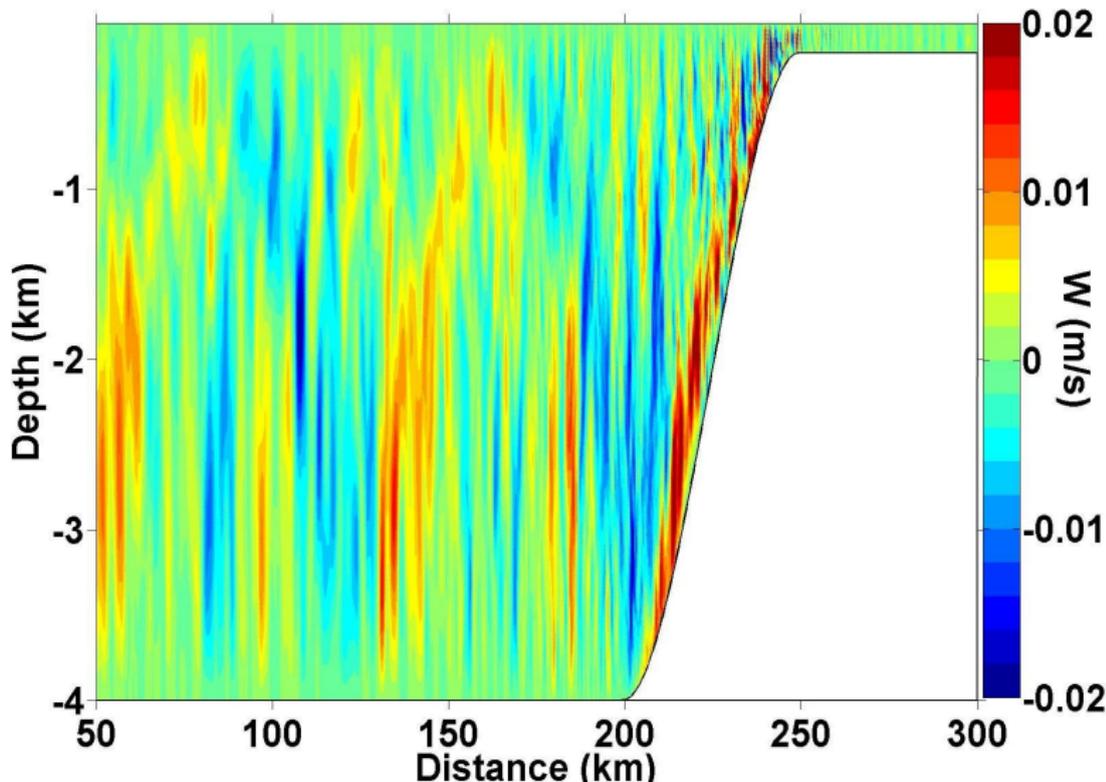
Conclusions

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Conclusions

de la partie numérique

Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Paramètres

Résultats

Conclusions

Dispositif
expérimental

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Paramètres

Résultats

Conclusions

Dispositif
expérimental

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Validation du code de calcul pour une stratification uniforme, par la relation de dispersion des ondes internes.

Conclusions

de la partie numérique

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Paramètres

Résultats

Conclusions

Dispositif
expérimental

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Validation du code de calcul pour une stratification uniforme, par la relation de dispersion des ondes internes.
- Toute la masse d'eau est perturbée par la marée interne, malgré l'organisation sous forme de rayons.

Conclusions

de la partie numérique

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Étude numérique

Paramètres

Résultats

Conclusions

Dispositif
expérimental

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Validation du code de calcul pour une stratification uniforme, par la relation de dispersion des ondes internes.
- Toute la masse d'eau est perturbée par la marée interne, malgré l'organisation sous forme de rayons.
- Génération d'harmoniques supérieurs par les effets non linéaires résultant de la superposition des rayons incident et réfléchi.

Conclusions

de la partie numérique

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Paramètres

Résultats

Conclusions

Dispositif
expérimental

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Validation du code de calcul pour une stratification uniforme, par la relation de dispersion des ondes internes.
- Toute la masse d'eau est perturbée par la marée interne, malgré l'organisation sous forme de rayons.
- Génération d'harmoniques supérieurs par les effets non linéaires résultant de la superposition des rayons incident et réfléchi.
- Cas d'une thermocline proche de la réalité :
 - le rayon de marée interne est réfracté par la présence de la thermocline.
 - l'énergie horizontale de la marée interne est concentrée au-dessus de la thermocline
 - l'énergie de la vitesse verticale reste au-dessous de la thermocline.

- Validation du code de calcul pour une stratification uniforme, par la relation de dispersion des ondes internes.
- Toute la masse d'eau est perturbée par la marée interne, malgré l'organisation sous forme de rayons.
- Génération d'harmoniques supérieurs par les effets non linéaires résultant de la superposition des rayons incident et réfléchi.
- Cas d'une thermocline proche de la réalité :
 - le rayon de marée interne est réfracté par la présence de la thermocline.
 - l'énergie horizontale de la marée interne est concentrée au-dessus de la thermocline
 - l'énergie de la vitesse verticale reste au-dessous de la thermocline.
- Peu de différences entre les cas hydrostatique et non-hydrostatique pour les situations considérées.

Photo de la grande cuve tournante Coriolis, pendant l'installation du talus

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Plate-forme CORIOLIS

Profil de densité

Méthode de visualisation (PIV)

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Canal et talus utilisés pour nos expériences

Vue de côté

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Plate-forme
CORIOLIS

Profils de densité

Méthode de
visualisation (PIV)

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses



Canal et talus utilisés pour nos expériences

Vue de dessus

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

**Plate-forme
CORIOLIS**

Profil de densité
Méthode de
visualisation (PIV)

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

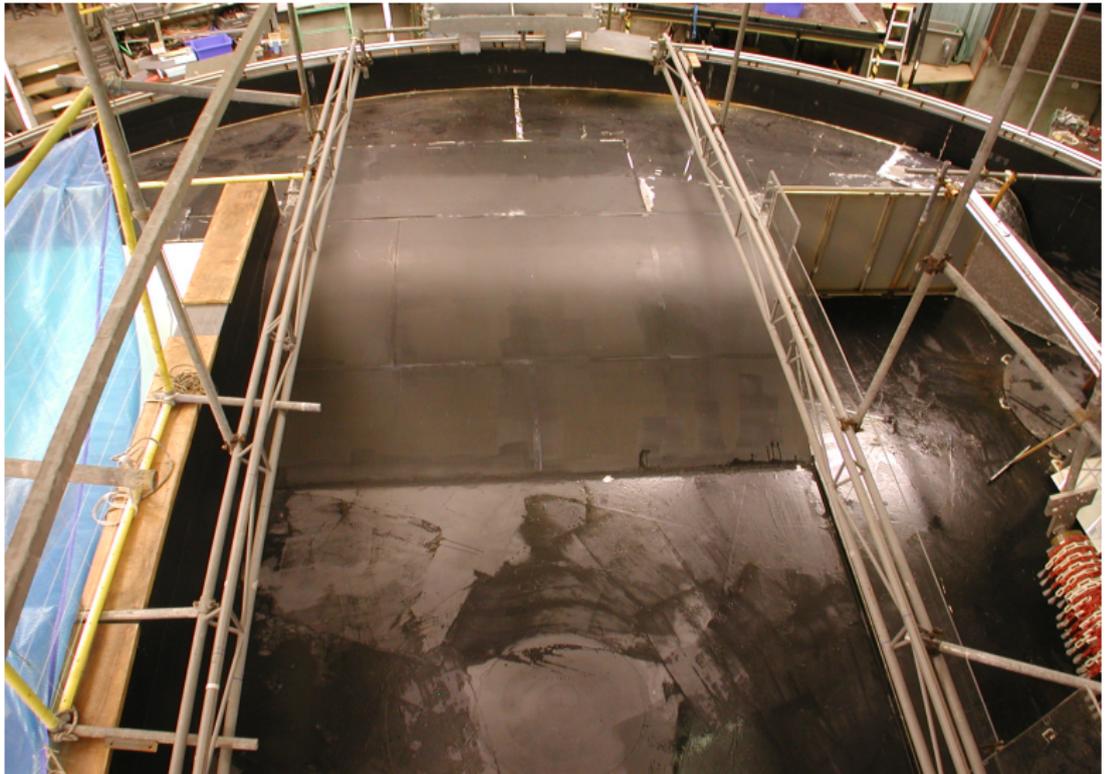
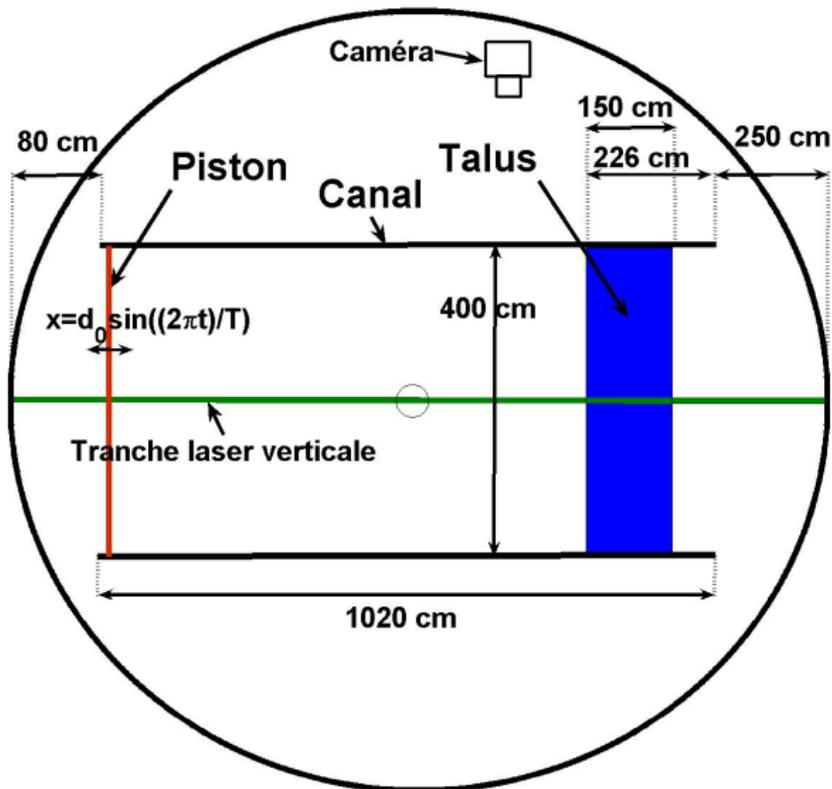


Schéma du canal

Vue de dessus



Propagation et

 réflexion de la

 marée interne:

 une étude

 numérique et

 expérimentale.

Mahdi

 MOHAMMAD

 MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif

 expérimental

Plate-forme

 CORIOLIS

Profil de densité

Méthode de

 visualisation (PIV)

Résultats

Conclusions et

 perspectives

Questions-

 Réponses

Schéma du canal

Vue de côté et trois fenêtres de prise d'images pour la PIV

Propagation et

 réflexion de la

 marée interne:

 une étude

 numérique et

 expérimentale.

Mahdi

 MOHAMMAD

 MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif

 expérimental

Plate-forme

 CORIOLIS

Profils de densité

Méthode de

 visualisation (PIV)

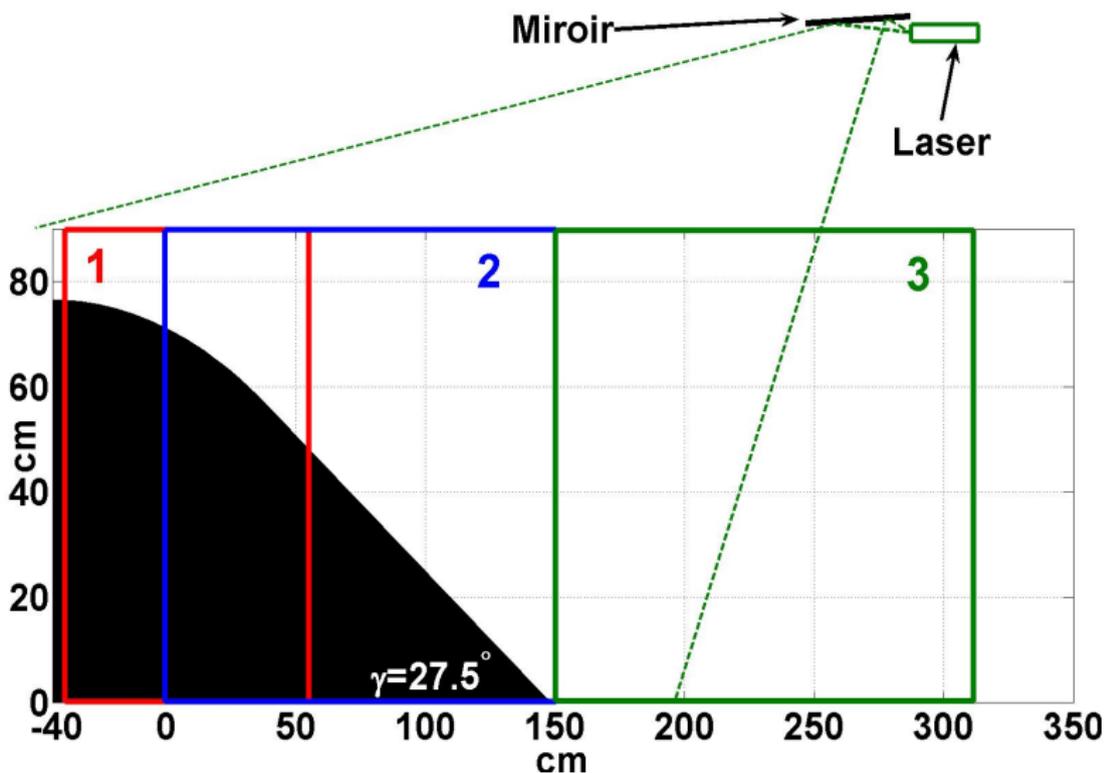
Résultats

Conclusions et

 perspectives

Questions-

 Réponses



Champs de densité et valeurs de N

pour les expériences faites en Juin et Juillet et en Septembre 2006

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Plate-forme CORIOLIS

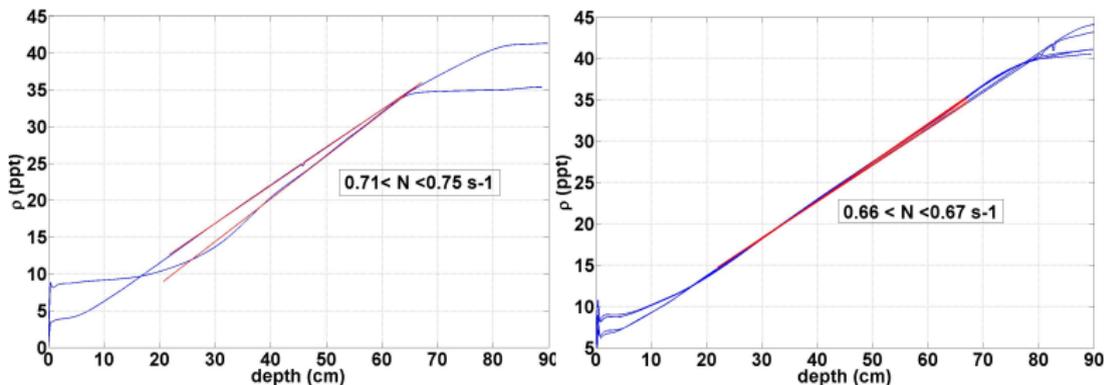
Profils de densité

Méthode de visualisation (PIV)

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



en Juin et Juillet
pendant 5 semaines

et

en Septembre
pendant 10 jours

Photo instantanée des particules

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Plate-forme CORIOLIS

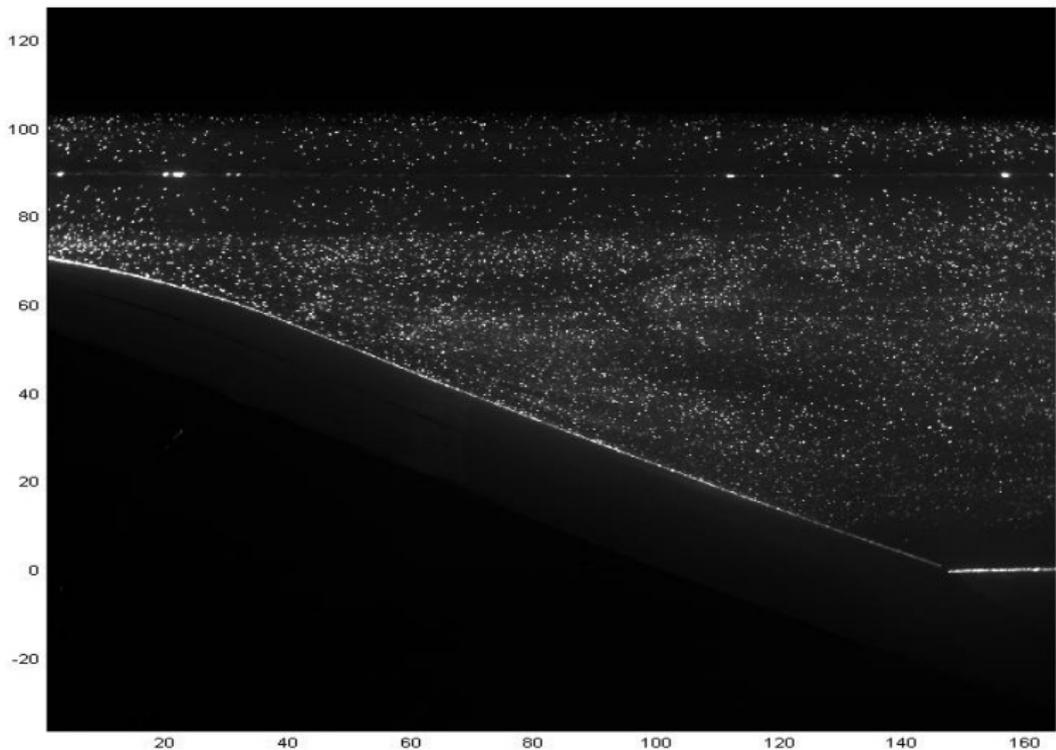
Profil de densité

Méthode de visualisation (PIV)

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Visualisation du mouvement des particules

Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Plate-forme
CORIOLIS

Profil de densité

Méthode de
visualisation (PIV)

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

Filme

Champ de vitesse obtenu par PIV déplacement des particules pendant 1s

Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Plate-forme
CORIOLIS

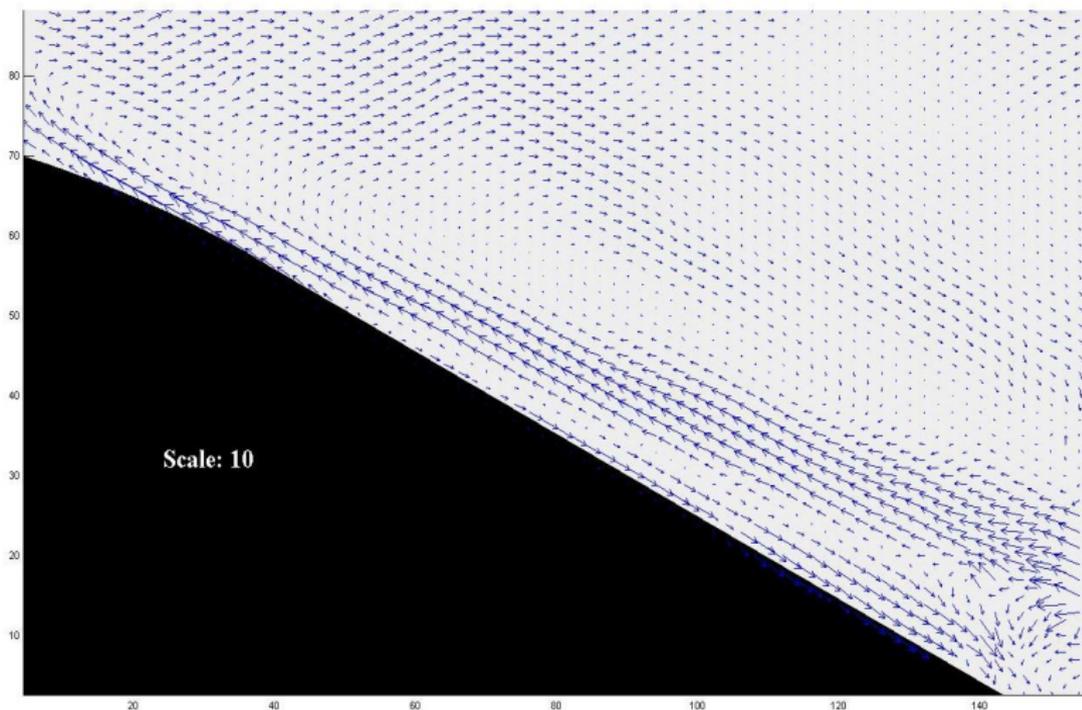
Profil de densité

Méthode de
visualisation (PIV)

Résultats

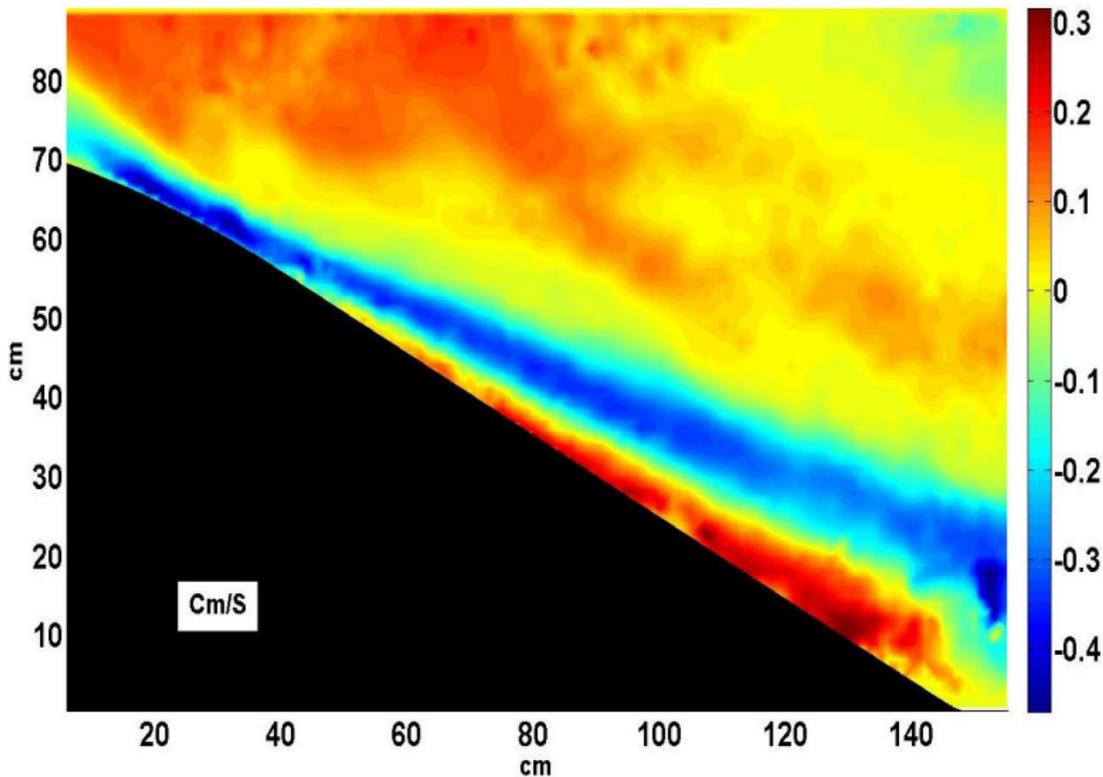
Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses



Composante horizontale du champ de vitesse (u)

Pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $T_R=0s$, $d_0=0.605cm$, $\theta=19.7^\circ$ (EXPB5) entre le temps 80s et 81s après le début de l'expérience



Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Structure du champ
d'ondes internes

Forçage de faible
amplitude

Augmentation de
l'amplitude de forçage

Influence de la
rotation

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Période de forçage :
 $25 \leq T \leq 71.81$ [s] $\Rightarrow 0.087 \leq \omega \leq 0.25$ [rad/s]
- Fréquence de Brunt-Väisälä :
 $0.66 \leq N \leq 0.75$ [rad/s] $\Rightarrow 0.13 \leq \frac{\omega}{N} \leq 0.36$
- Période de rotation : $T_R = \infty, 90, 115, 130$ [s]
- Angle du rayon avec l'horizontale : $4.8^\circ \leq \theta \leq 20.1^\circ$
- Amplitude de forçage : $d_0 = 0.605, 0.92, 2, 3.1$ [cm]

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Structure du champ
d'ondes internes

Forçage de faible
amplitude

Augmentation de
l'amplitude de forçage

Influence de la
rotation

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Période de forçage :

$$25 \leq T \leq 71.81 \text{ [s]} \Rightarrow 0.087 \leq \omega \leq 0.25 \text{ [rad/s]}$$

- Fréquence de Brunt-Väisälä :

$$0.66 \leq N \leq 0.75 \text{ [rad/s]} \Rightarrow 0.13 \leq \frac{\omega}{N} \leq 0.36$$

- Période de rotation : $T_R = \infty, 90, 115, 130 \text{ [s]}$

- Angle du rayon avec l'horizontale : $4.8^\circ \leq \theta \leq 20.1^\circ$

- Amplitude de forçage : $d_0 = 0.605, 0.92, 2, 3.1 \text{ [cm]}$

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Structure du champ
d'ondes internes

Forçage de faible
amplitude

Augmentation de
l'amplitude de forçage

Influence de la
rotation

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Période de forçage :

$$25 \leq T \leq 71.81 \text{ [s]} \Rightarrow 0.087 \leq \omega \leq 0.25 \text{ [rad/s]}$$

- **Fréquence de Brunt-Väisälä :**

$$0.66 \leq N \leq 0.75 \text{ [rad/s]} \Rightarrow 0.13 \leq \frac{\omega}{N} \leq 0.36$$

- Période de rotation : $T_R = \infty, 90, 115, 130 \text{ [s]}$

- Angle du rayon avec l'horizontale : $4.8^\circ \leq \theta \leq 20.1^\circ$

- Amplitude de forçage : $d_0 = 0.605, 0.92, 2, 3.1 \text{ [cm]}$

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Structure du champ
d'ondes internes

Forçage de faible
amplitude

Augmentation de
l'amplitude de forçage

Influence de la
rotation

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Période de forçage :

$$25 \leq T \leq 71.81 \text{ [s]} \Rightarrow 0.087 \leq \omega \leq 0.25 \text{ [rad/s]}$$

- Fréquence de Brunt-Väisälä :

$$0.66 \leq N \leq 0.75 \text{ [rad/s]} \Rightarrow 0.13 \leq \frac{\omega}{N} \leq 0.36$$

- Période de rotation : $T_R = \infty, 90, 115, 130 \text{ [s]}$

- Angle du rayon avec l'horizontale : $4.8^\circ \leq \theta \leq 20.1^\circ$

- Amplitude de forçage : $d_0 = 0.605, 0.92, 2, 3.1 \text{ [cm]}$

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Structure du champ
d'ondes internes

Forçage de faible
amplitude

Augmentation de
l'amplitude de forçage

Influence de la
rotation

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Période de forçage :
 $25 \leq T \leq 71.81$ [s] $\Rightarrow 0.087 \leq \omega \leq 0.25$ [rad/s]
- Fréquence de Brunt-Väisälä :
 $0.66 \leq N \leq 0.75$ [rad/s] $\Rightarrow 0.13 \leq \frac{\omega}{N} \leq 0.36$
- Période de rotation : $T_R = \infty, 90, 115, 130$ [s]
- Angle du rayon avec l'horizontale : $4.8^\circ \leq \theta \leq 20.1^\circ$
- Amplitude de forçage : $d_0 = 0.605, 0.92, 2, 3.1$ [cm]

- Période de forçage :
 $25 \leq T \leq 71.81$ [s] $\Rightarrow 0.087 \leq \omega \leq 0.25$ [rad/s]
- Fréquence de Brunt-Väisälä :
 $0.66 \leq N \leq 0.75$ [rad/s] $\Rightarrow 0.13 \leq \frac{\omega}{N} \leq 0.36$
- Période de rotation : $T_R = \infty, 90, 115, 130$ [s]
- Angle du rayon avec l'horizontale : $4.8^\circ \leq \theta \leq 20.1^\circ$
- **Amplitude de forçage : $d_0 = 0.605, 0.92, 2, 3.1$ [cm]**

Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

**Structure du champ
d'ondes internes**

Forçage de faible
amplitude

Augmentation de
l'amplitude de forçage

Influence de la
rotation

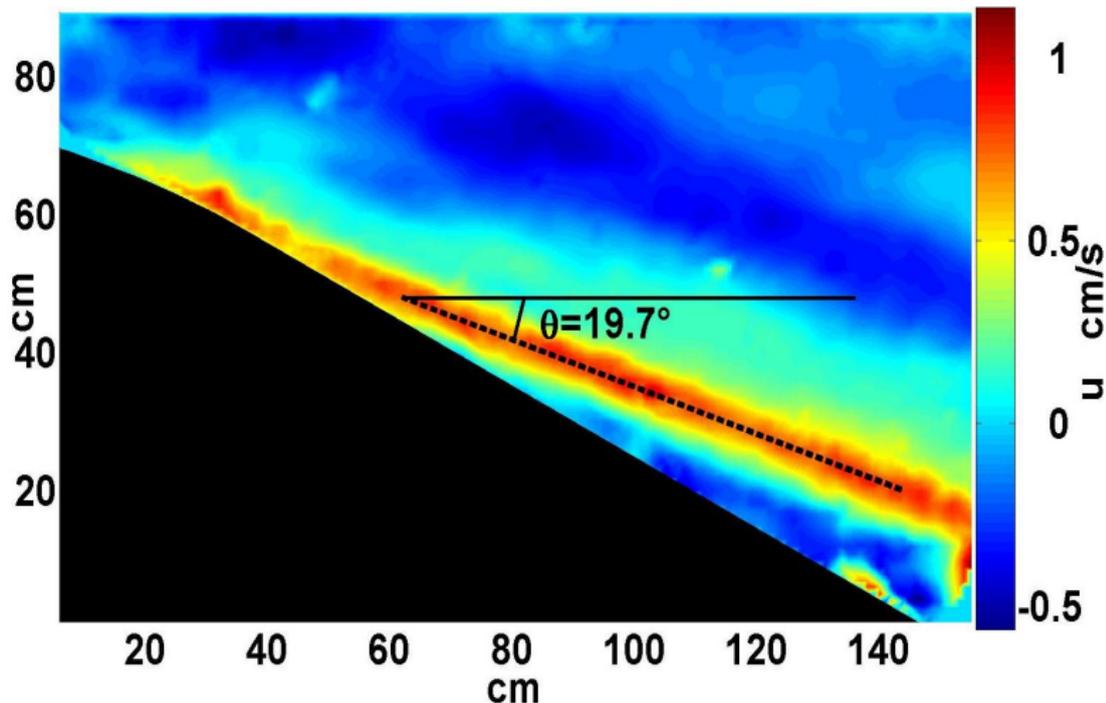
Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

Structure du champ d'ondes internes

Calcul de θ par la relation de dispersion :

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\omega}{N}\right) \text{ soit ici } \theta = 19.7^\circ$$



Champs instantanés de la vitesse horizontale u au début de la 11.5ème période pour l'expérience EXPB5 ($\frac{\omega}{N}=0.34$)

Composante horizontale du champ de vitesse (u) et existence des rayons réfléchis

Pour $\frac{\omega}{N} = 0.34$, $d_0 = 0.605 \text{ cm}$, $T = 27.92 \text{ s}$ à 4.5ème période (GERK7-14)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

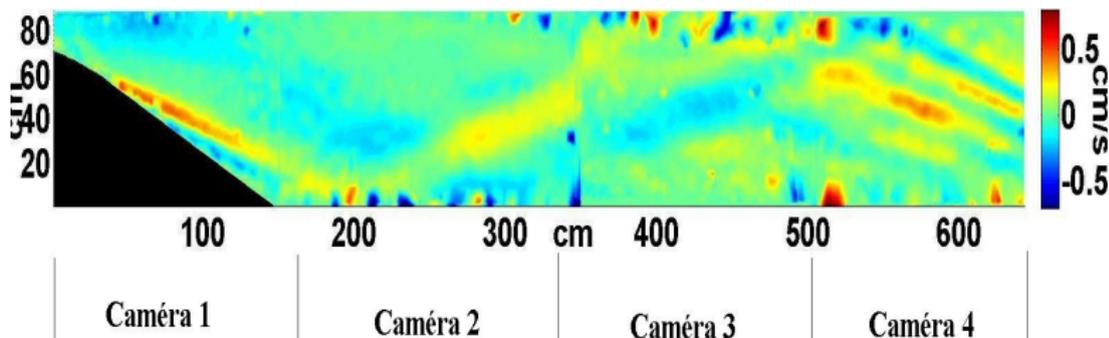
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Structure du champ
d'ondes internes

**Forçage de faible
amplitude**

Augmentation de
l'amplitude de forçage

Influence de la
rotation

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

Forçage de faible amplitude

Positions des points de mesure sur talus pour les séries temporelles

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

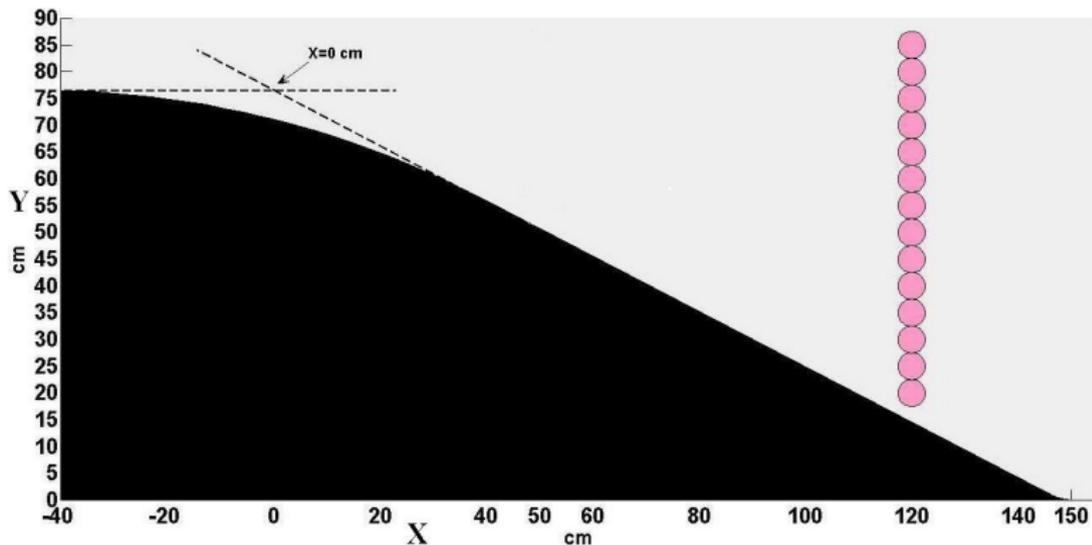
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Séries temporelles de u sur les points avec

$x=120\text{cm}$ et $\overline{U} \times 5$

Pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $T_R=0\text{s}$, $d_0=0.605\text{cm}$, $\theta=19.7^\circ$ (EXPB5)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

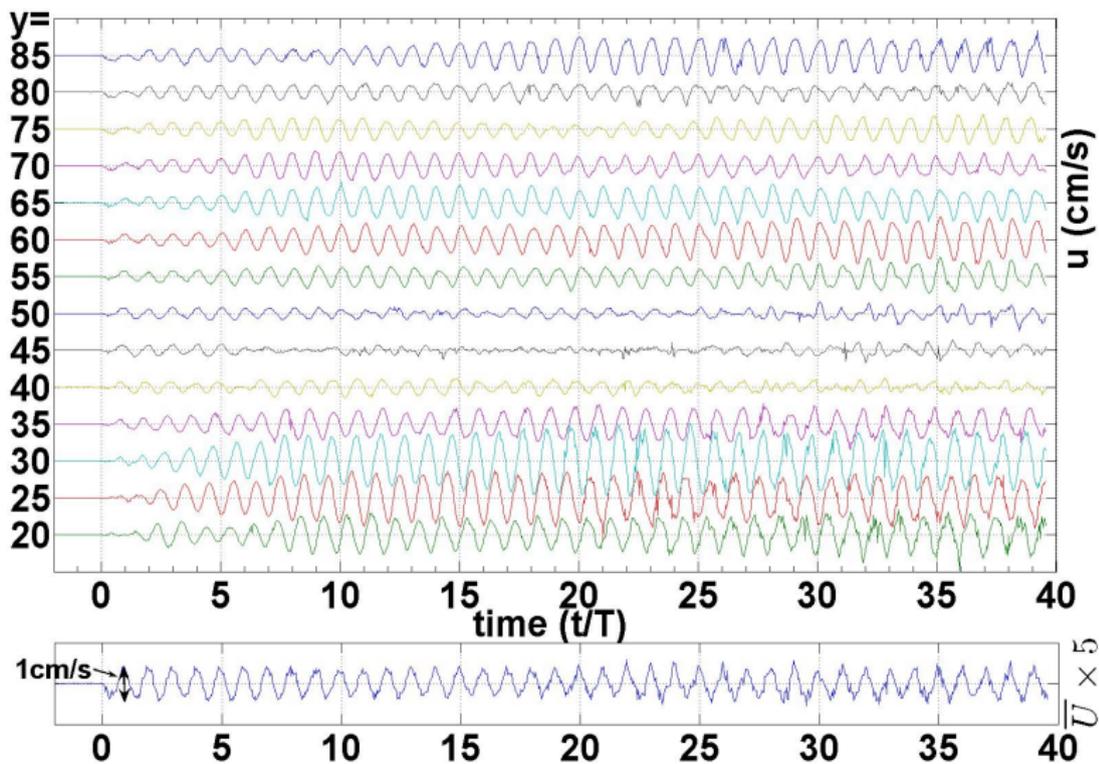
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Amplitude de la vitesse horizontale

Pour la n ème harmonique, entre les temps t_1 et t_2

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses

$$\omega_n = n \frac{2\pi}{T}$$

$$a_n(x, y) = \frac{2}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(x, y, t) \cos(\omega_n t) dt$$

$$b_n(x, y) = \frac{2}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(x, y, t) \sin(\omega_n t) dt$$

$$A_n(u) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Amplitude de la vitesse horizontale

Pour la n ème harmonique, entre les temps t_1 et t_2

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses

$$\omega_n = n \frac{2\pi}{T}$$

$$a_n(x, y) = \frac{2}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(x, y, t) \cos(\omega_n t) dt$$

$$b_n(x, y) = \frac{2}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(x, y, t) \sin(\omega_n t) dt$$

$$A_n(u) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$U_0 = \omega d_0, \quad \bar{U}(x, t) = \frac{1}{H - h(x)} \int_{h(x)}^H u(x, y, t) dy$$

$$\bar{U}_{norm} = \frac{\bar{U}}{U_0}, \quad Flux_{norm} = \bar{U}_{norm} \frac{(H - h(x))}{H}$$

$A_1(Flux_{norm})$ et $A_1(\bar{U}_{norm})$ calculé de la 2ème à la 18ème période

Pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $T_R=0s$, $d_0=0.605cm$, $\theta=19.7^\circ$

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

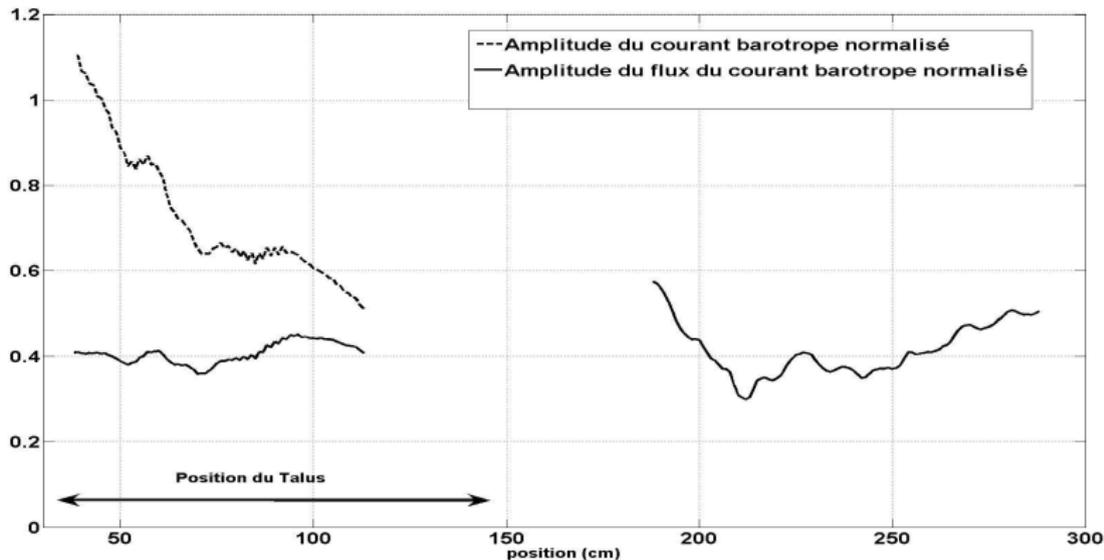
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



$A_1(u)$ et les directions σ et S

Pour $\frac{\omega}{N} = 0.34$, $T_R = 0s$, $d_0 = 0.605cm$, $\theta = 19.7^\circ$ (EXPB5)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

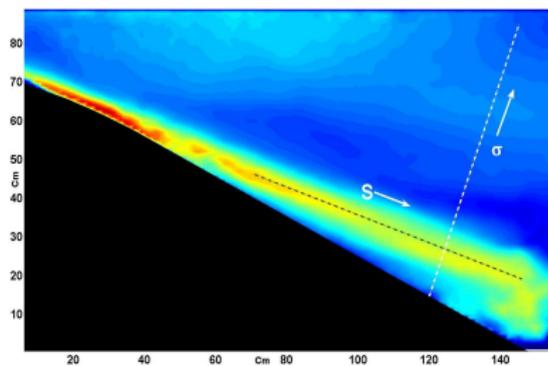
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

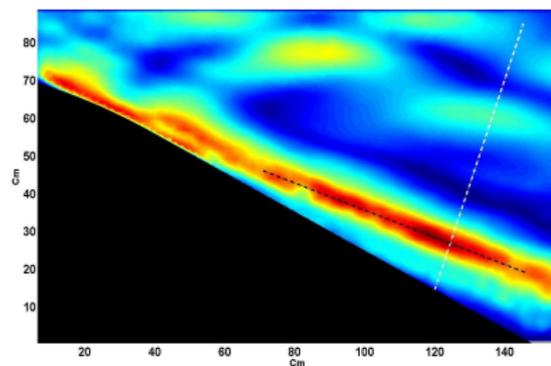
Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



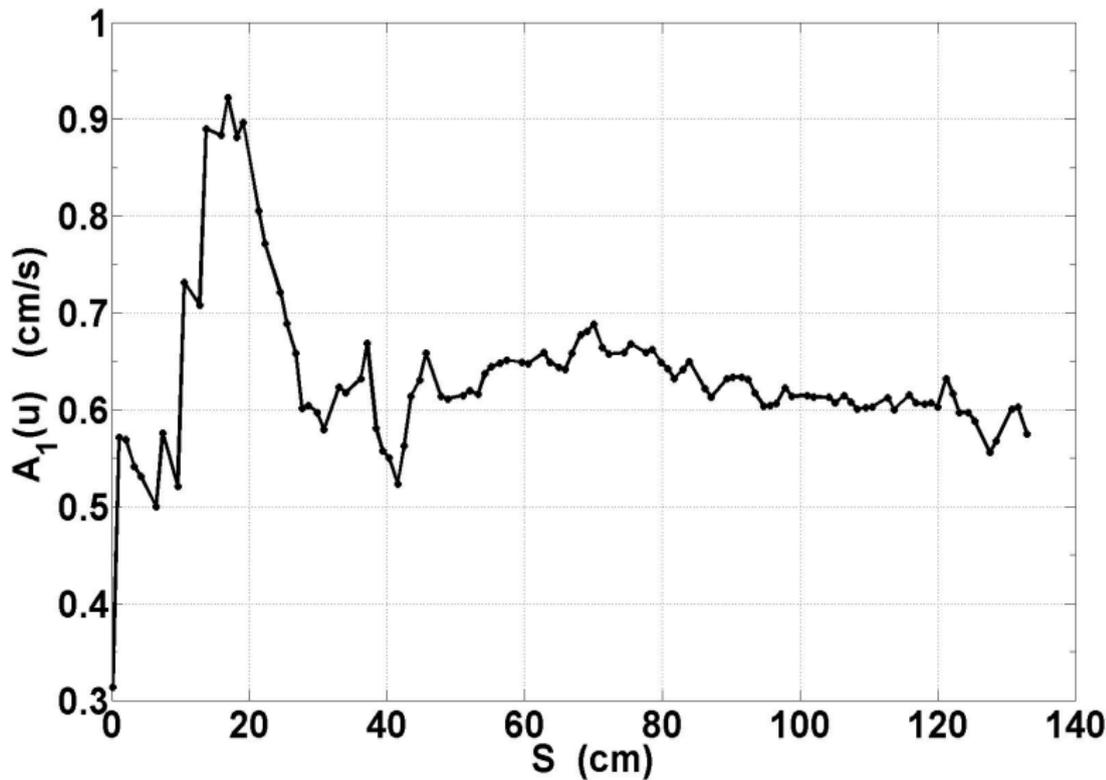
Calculé de la 3ème à la 5ème période



Calculé de la 18ème à la 22ème période

$A_1(u)$ dans le rayon à partir de la zone de génération

Calculé entre la 5ème et la 7ème période pour $\frac{\omega}{N} = 0.34$ (EXPB5)



$A_1(u)$ suivant la direction perpendiculaire au rayon

Pour $\frac{\omega}{N} = 0.34$, $T_R = 0s$, $d_0 = 0.605cm$, $\theta = 19.7^\circ$ (EXPB5)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

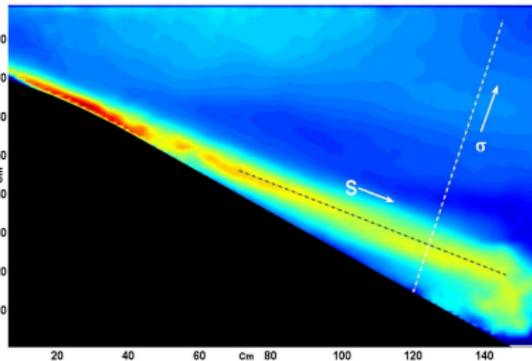
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

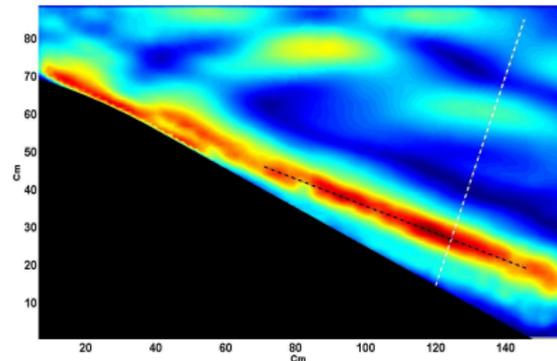
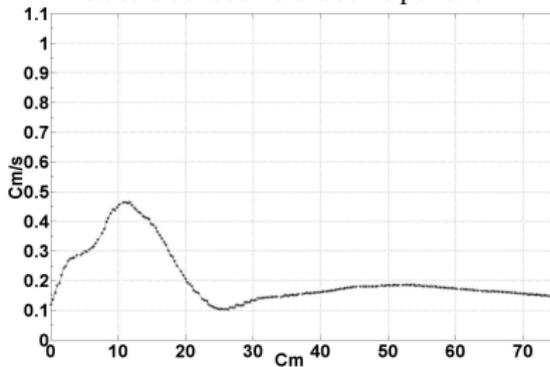
Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

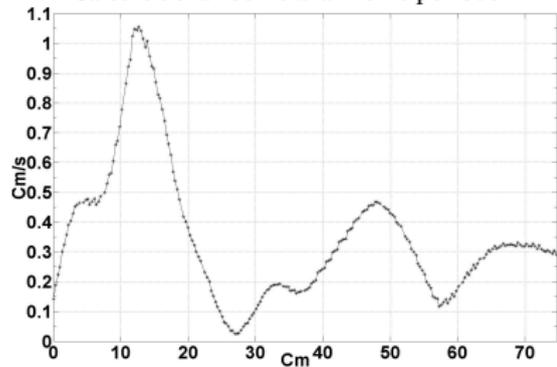
Questions-Réponses



Calculé de la 3ème à la 5ème période

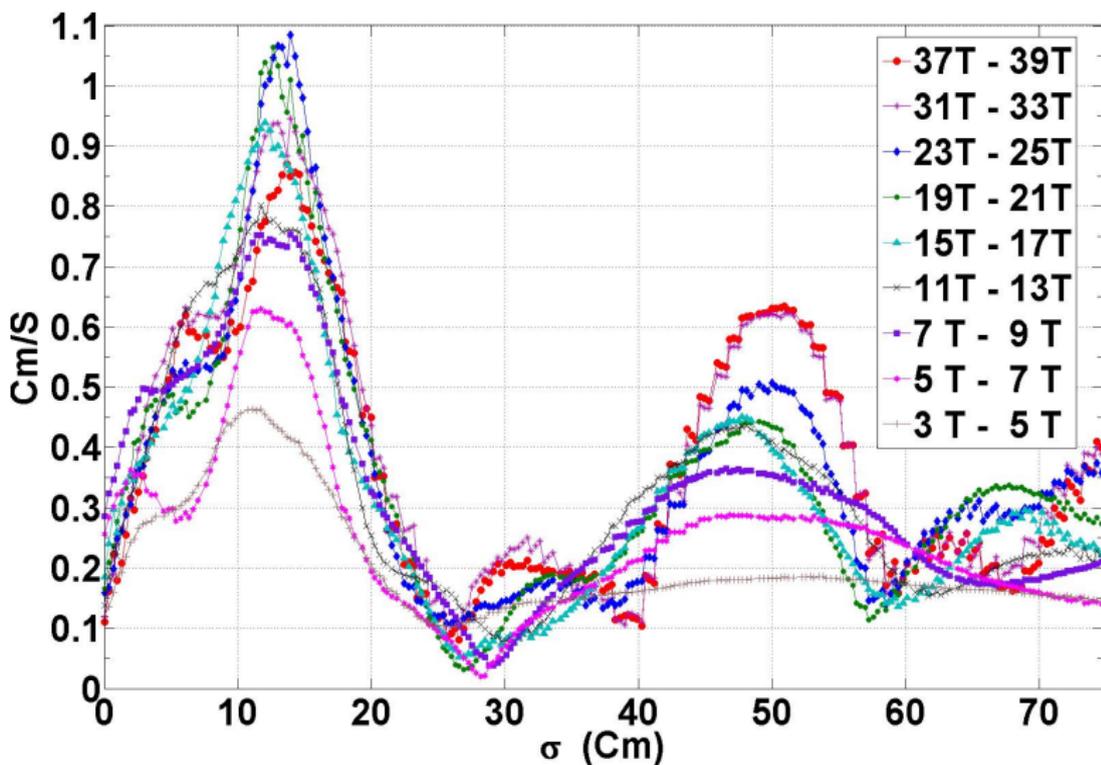


Calculé de la 18ème à la 22ème période



Valeur de $A_1(u)$ suivant la direction σ pour différents intervalles de temps

Pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $T_R=0s$, $d_0=0.605cm$, $\theta=19.7^\circ$ (EXPB5)



Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses

Enveloppe de la vitesse longitudinale u_s suivant la direction perpendiculaire au rayon σ

Pendant une période d'oscillation

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Étude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

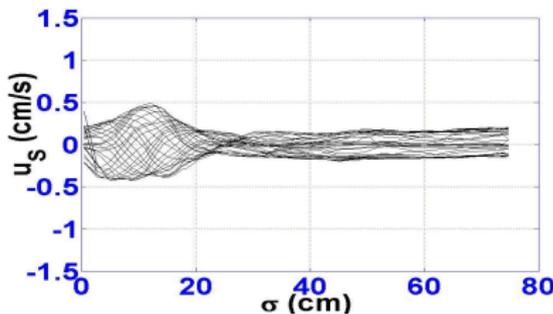
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

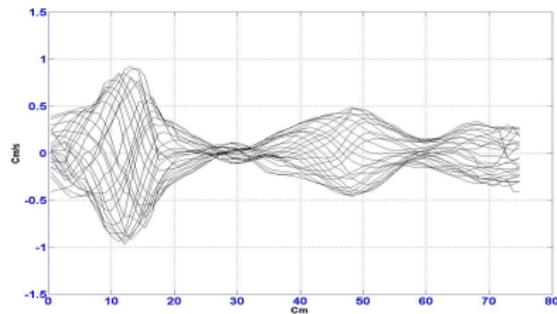
Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



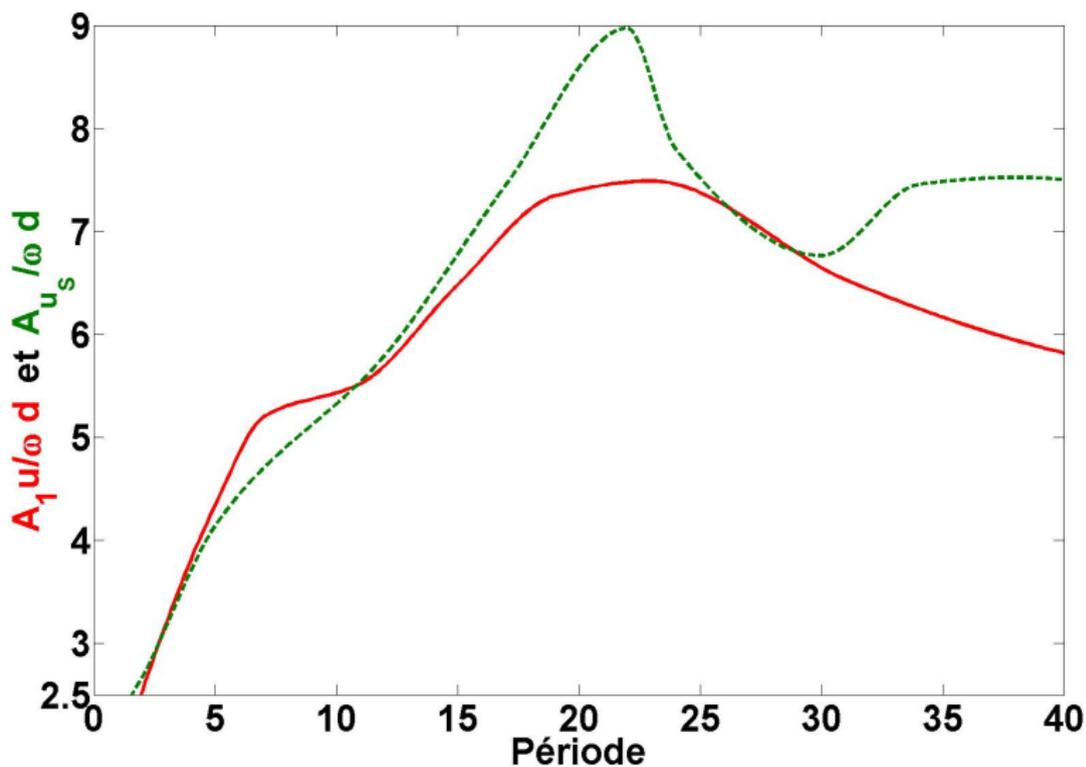
En 3ème période pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $T_R=0s$,
 $d_0=0.605cm$, $\theta=19.7^\circ$ (EXPB5)



En 16ème période pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $T_R=0s$,
 $d_0=0.605cm$, $\theta=19.7^\circ$ (EXPB5)

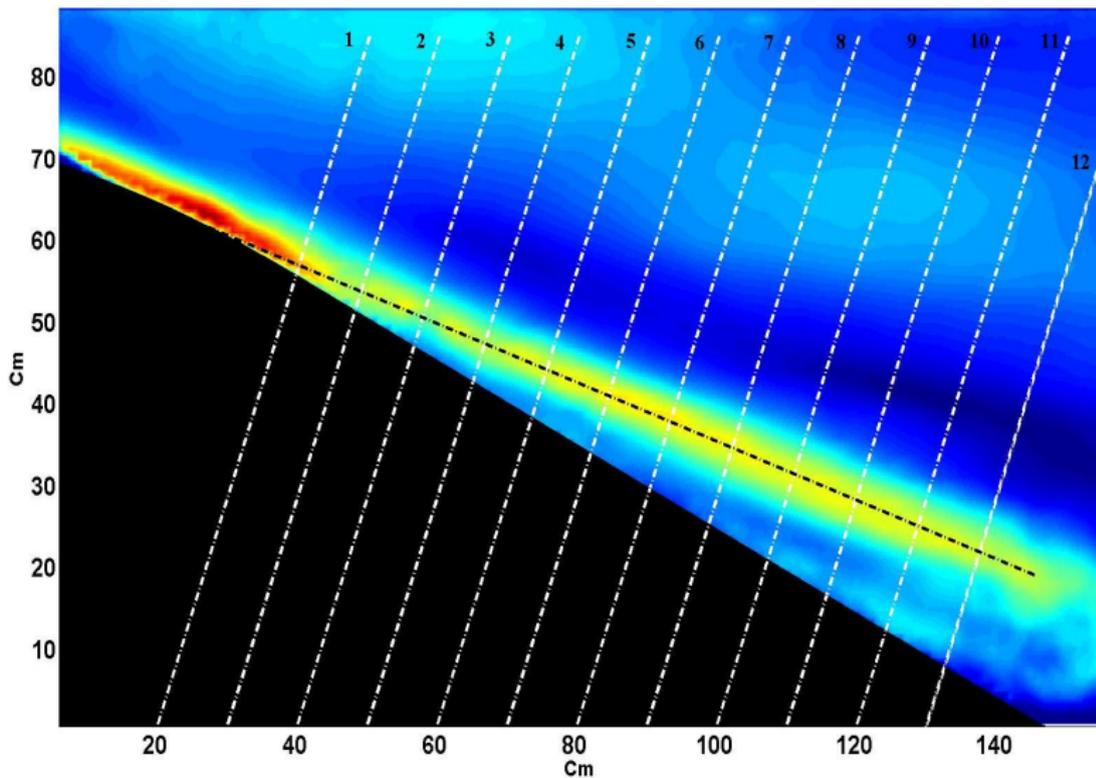
$A_1(u)$ et A_{us} normalisées dans le rayon incident principal

Pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $T_R=0s$, $d_0=0.605cm$, $\theta=19.7^\circ$ (EXPB5)



$$A_1(u)$$

Calculé entre la 5ème et la 7ème période pour $\frac{\omega}{N}=0.34$ (EXPB5)



Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

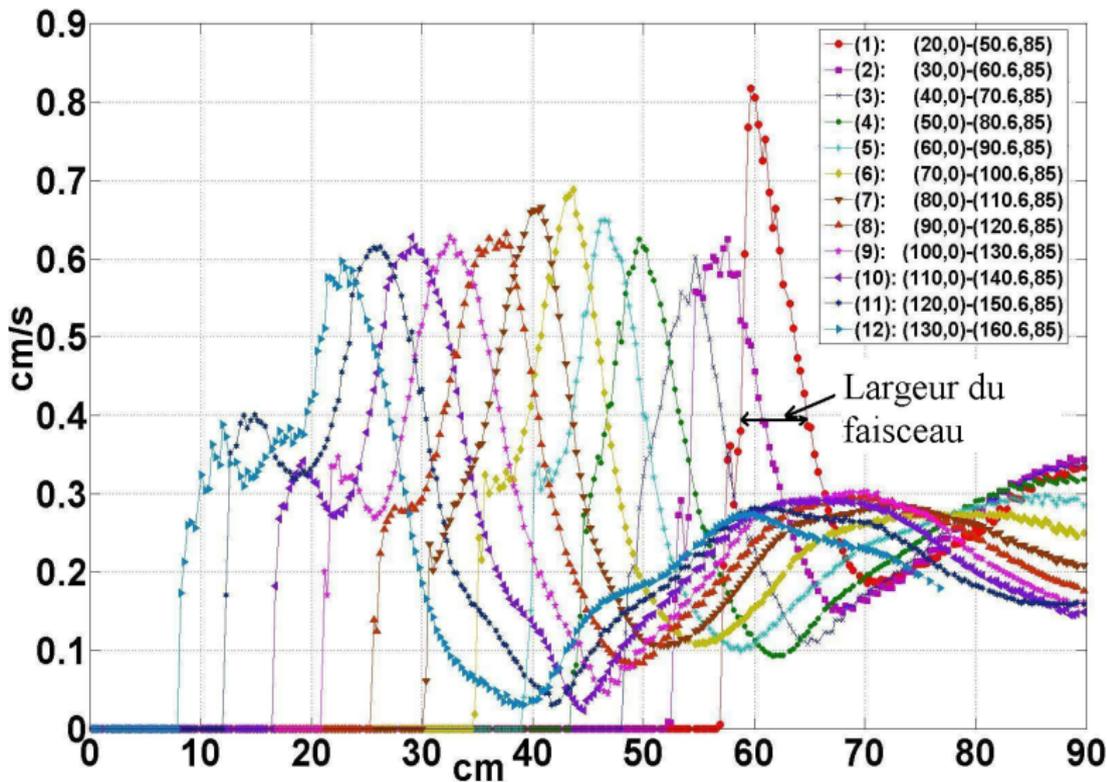
Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses

$A_1(u)$ sur les lignes perpendiculaires au rayon

Calculé entre la 5ème et la 7ème période pour $\frac{\omega}{N} = 0.34$ (EXPB5)



Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

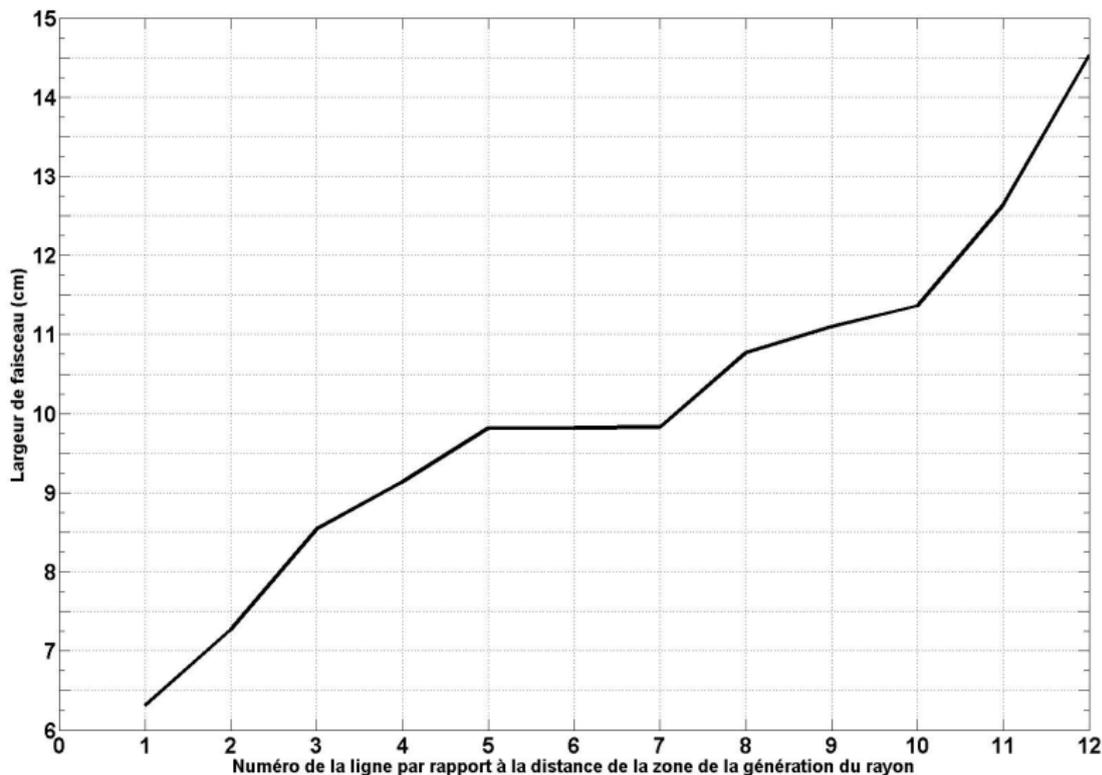
Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses

Largeur du faisceau à partir de $A_1(u)$

Calculé entre la 5ème et la 7ème période pour $\frac{\omega}{N}=0.34$ (EXPB5)



Estimation de la largeur du faisceau : à partir de la phase du champ d'onde

Pour la n ème harmonique, entre les temps t_1 et t_2

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses

$$\omega_n = n \frac{2\pi}{T}$$

$$a_n(x, y) = \frac{2}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(x, y, t) \cos(\omega_n t) dt$$

$$b_n(x, y) = \frac{2}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(x, y, t) \sin(\omega_n t) dt$$

$$\varphi_n(u) = \arctan \left(\frac{b_n(x, y)}{a_n(x, y)} \right)$$

$$\varphi_1(u) = k \cdot \sigma - \omega t \Rightarrow k = \partial \varphi_1 / \partial \sigma \text{ et } \lambda = \frac{2\pi}{k}, c_p = \frac{\omega}{k}$$

Largeur du faisceau définie par : $\frac{\lambda}{2} = \frac{\pi}{k}$

Phase et calcul du vecteur d'onde au milieu du faisceau

Calculé entre la 3ème et la 5ème période pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $d_0=0.605\text{cm}$ (EXPB5)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

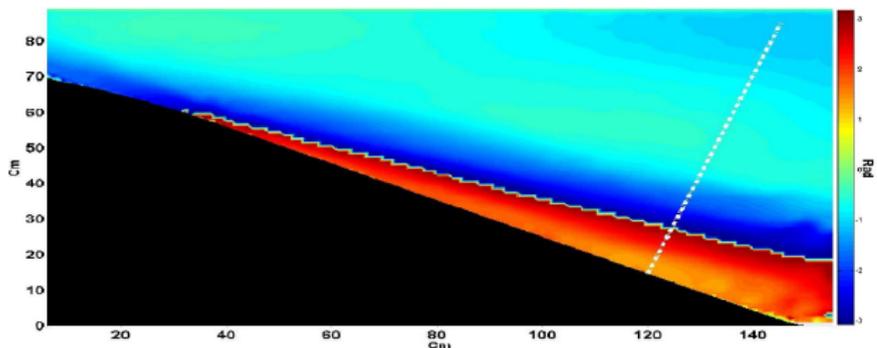
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Champ de phase ($\varphi_1(u)$) et position de la ligne perpendiculaire au rayon

Phase et calcul du vecteur d'onde au milieu du faisceau

Calculé entre la 3ème et la 5ème période pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $d_0=0.605\text{cm}$ (EXPB5)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

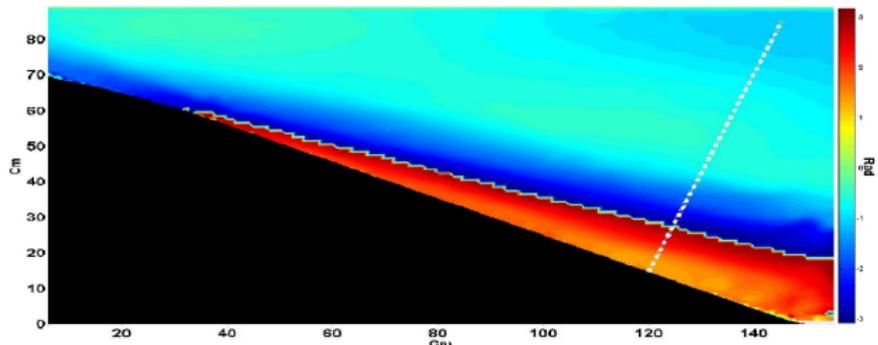
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

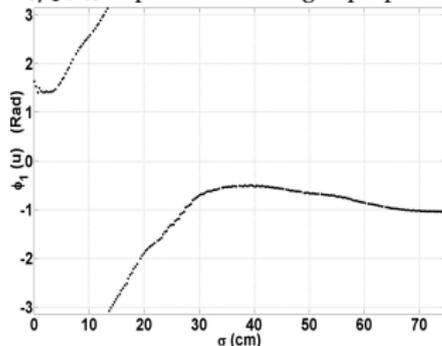
Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Champ de phase ($\varphi_1(u)$) et position de la ligne perpendiculaire au rayon



Valeur de la phase en direction de σ

Phase et calcul du vecteur d'onde au milieu du faisceau

Calculé entre la 3ème et la 5ème période pour $\frac{\omega}{N} = 0.34$, $d_0 = 0.605 \text{ cm}$ (EXPB5)

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

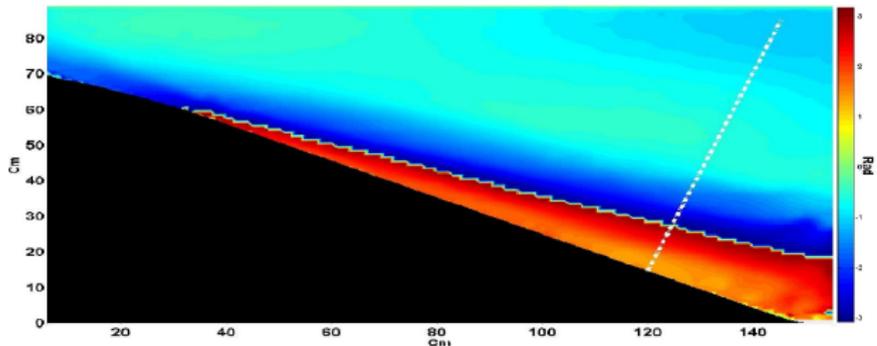
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

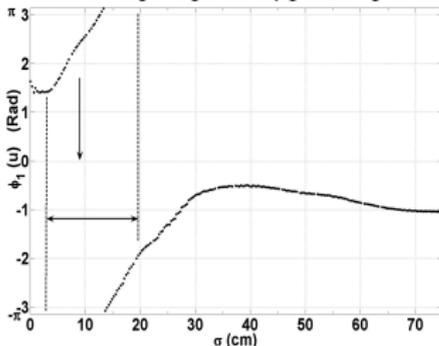
Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

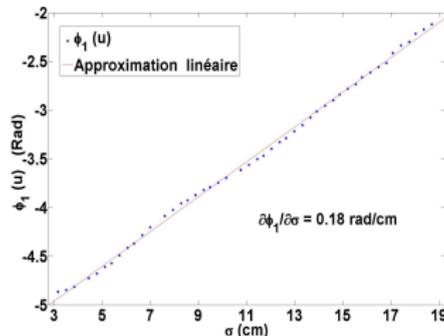
Questions-Réponses



Champ de phase ($\phi_1(u)$) et position de la ligne perpendiculaire au rayon



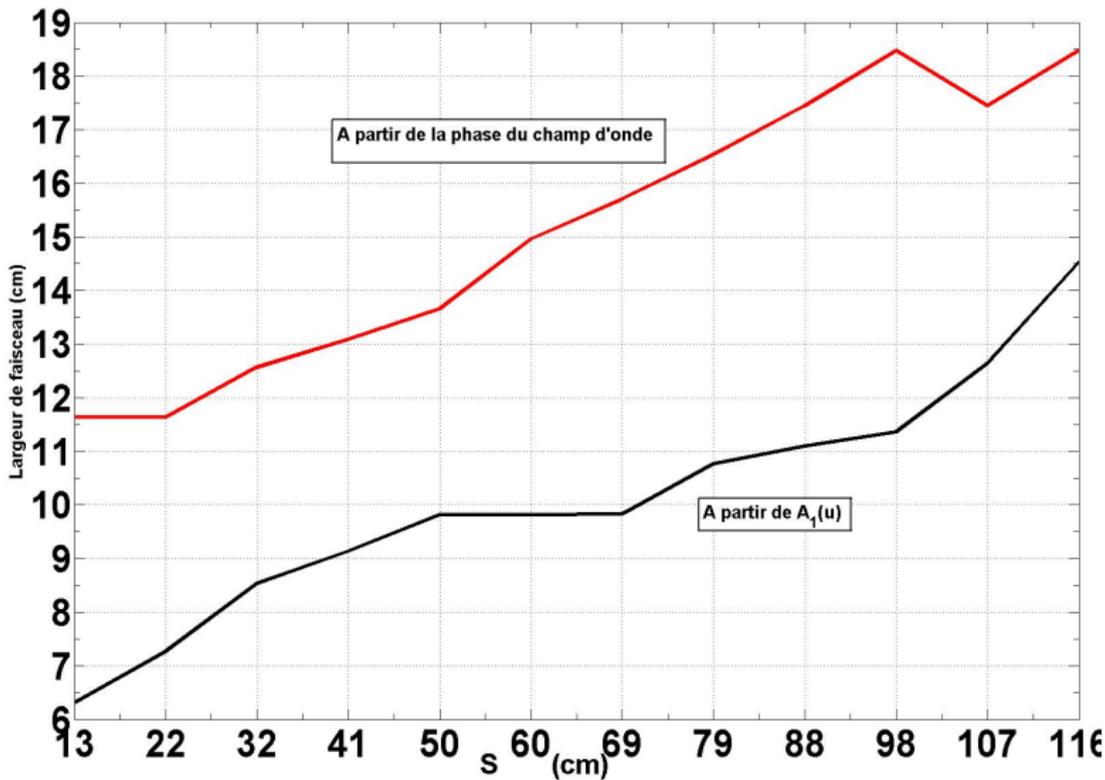
Valeur de la phase en direction de σ



Valeur de la phase au milieu du faisceau et $k = \partial\phi_1 / \partial\sigma$

Largeur du faisceau estimée par 2 méthodes

Calculé entre la 5ème et la 7ème période pour $\frac{\omega}{N}=0.34$ (EXPB5)



Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Structure du champ
d'ondes internes

Forçage de faible
amplitude

**Augmentation de
l'amplitude de forçage**

Influence de la
rotation

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

Augmentation de l'amplitude de forçage

Amplitude de la deuxième harmonique $A_2(u)$ en augmentant l'amplitude de forçage

Calculé entre la 18ème et la 22ème période

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

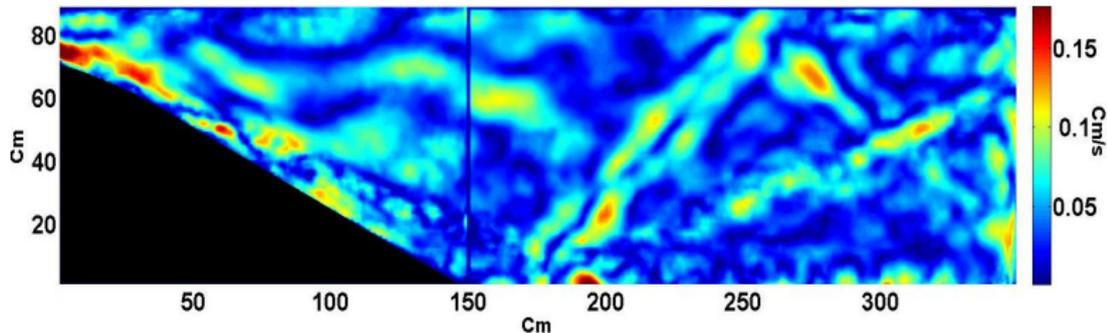
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

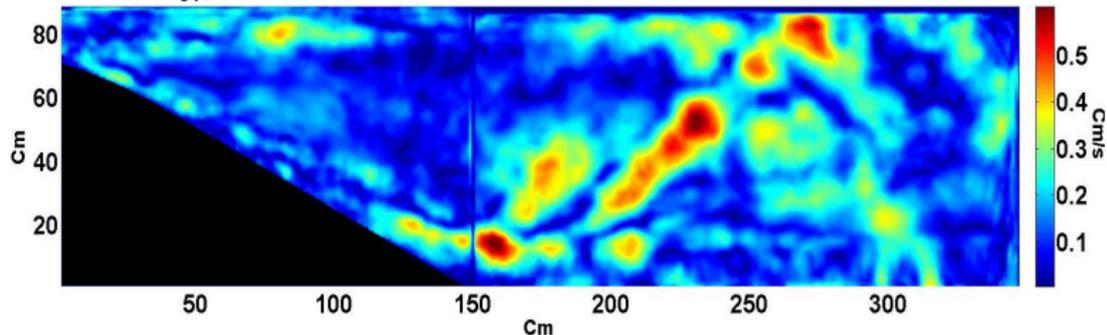
Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $d_0=0.605$ cm et $\theta_2=43.5^\circ$ (l'expérience GERK7)



Pour $\frac{\omega}{N}=0.34$, $d_0=2.0$ cm et $\theta_2=43.1^\circ$ (l'expérience GERK12)

Amplitude de la sous harmonique de u ($A_{\frac{1}{2}}(u)$)

Instabilité paramétrique dans le rayon

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

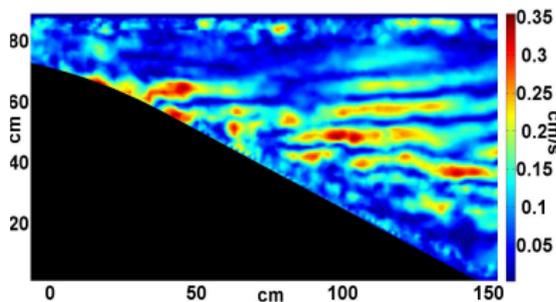
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

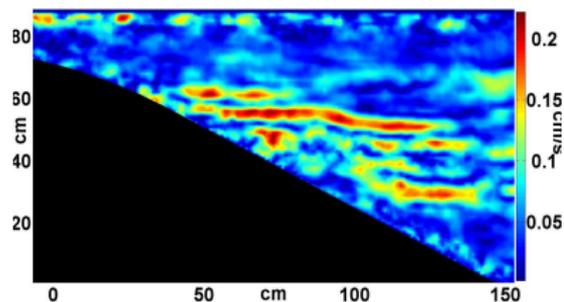
Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Calculé entre la 18ème et la 22ème période pour

$T=31.0$ s, $d_0=2.0$ cm (EXPB37)



Calculé entre la 28ème et la 36ème période pour

$T=31.0$ s, $d_0=2.0$ cm (EXPB37)

Amplitude de la sous harmonique de u ($A_{\frac{1}{2}}(u)$)

Instabilité paramétrique dans le rayon

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Étude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

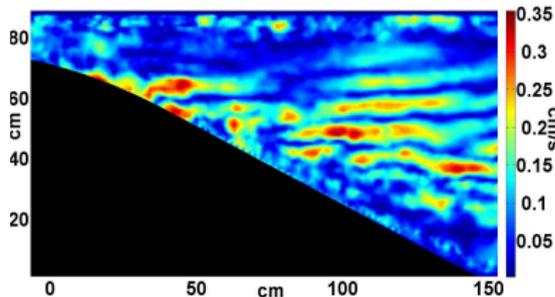
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

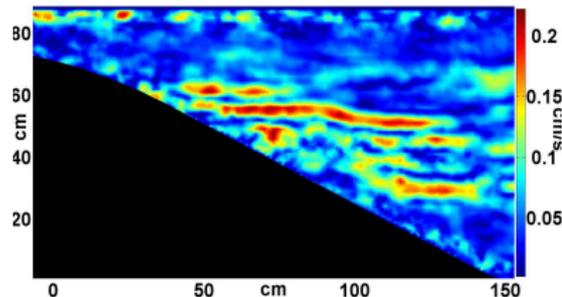
Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



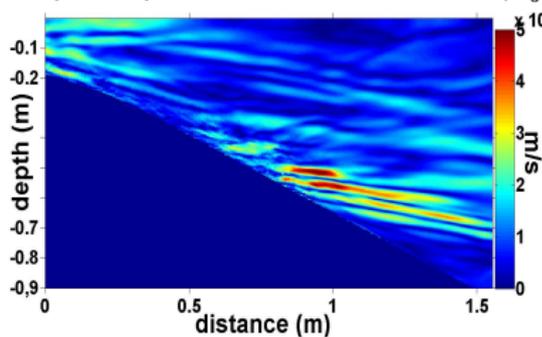
Calculé entre la 18^{ème} et la 22^{ème} période pour

$T=31.0$ s, $d_0=2.0$ cm (EXPB37)



Calculé entre la 28^{ème} et la 36^{ème} période pour

$T=31.0$ s, $d_0=2.0$ cm (EXPB37)



Calculé entre la 22^{ème} et la 25^{ème} période pour $T=26.1$ s et $d_0=0.24$ cm, obtenu par le code

numérique (calcul de I. Pairaud & C. Staquet)

Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Structure du champ
d'ondes internes

Forçage de faible
amplitude

Augmentation de
l'amplitude de forçage

**Influence de la
rotation**

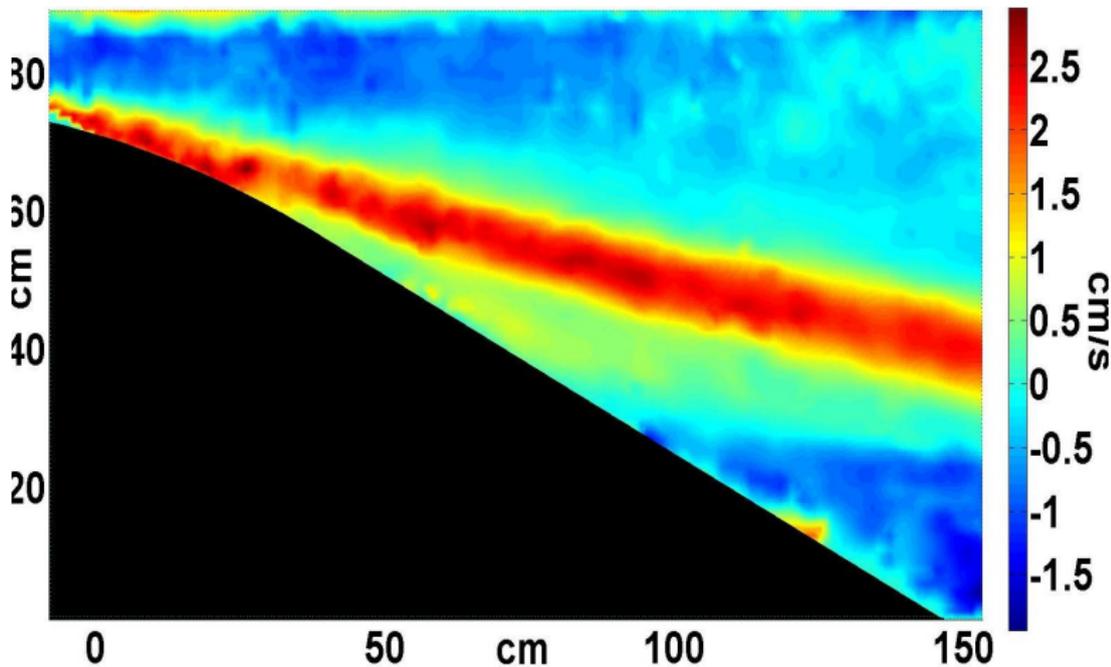
Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

Influence de la rotation

Composante horizontale du champ de vitesse (u) en présence de rotation

Pour $\frac{\omega}{N}=0.28$, $d_0=3.1\text{cm}$, $T=30.9\text{ s}$, $T_R=90\text{ s}$ à 4.5ème période (EXPB30)



Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Structure du champ
d'ondes internes

Forçage de faible
amplitude

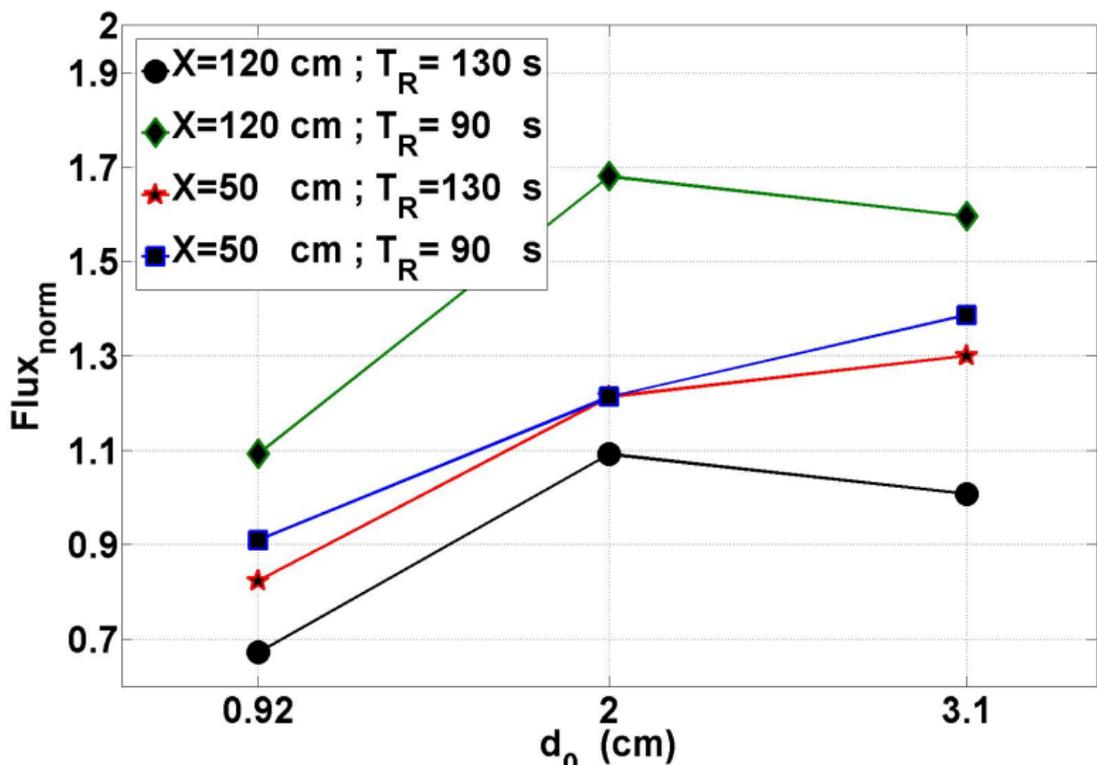
Augmentation de
l'amplitude de forçage

Influence de la
rotation

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

Flux_{norm} à x=50 cm et x=120 cm en présence de rotation en fonction de d_0



Enveloppe de u_S suivant la direction σ et influence de la rotation

Pendant une période d'oscillation et en 3ème période

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Étude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

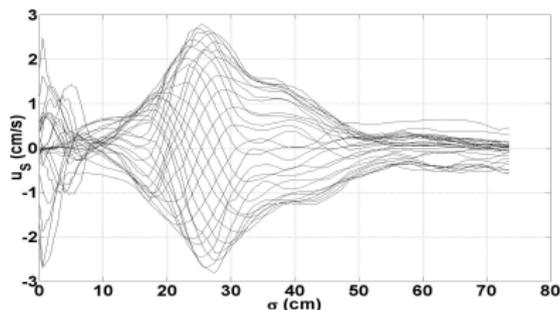
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

Influence de la rotation

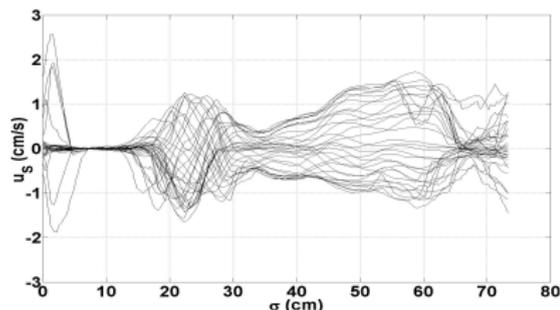
Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Pour $\frac{\omega}{N}=0.31$, $T_R=130s$, $d_0=3.1cm$, $\theta=16.4^\circ$

(EXPB32)

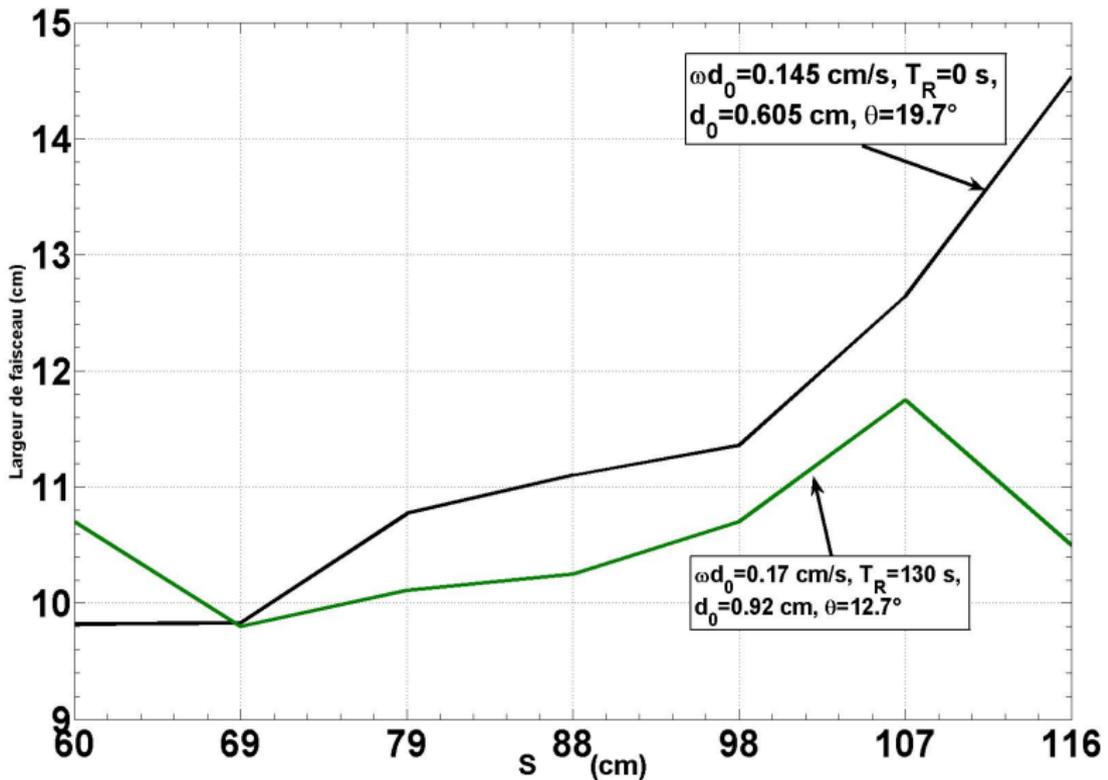


Pour $\frac{\omega}{N}=0.27$, $T_R=0s$, $d_0=3.1cm$, $\theta=15.9^\circ$

(EXPB39)

Largeur du faisceau à partir de $A_1(u)$

Calculé entre la 5ème et la 7ème période pour $\omega d_0 = 0.145 \text{ cm/s}$, $T_R = 0 \text{ s}$, $d_0 = 0.605 \text{ cm}$, $\theta = 19.7^\circ$ (EXPB5) et $\omega d_0 = 0.17 \text{ cm/s}$, $T_R = 130 \text{ s}$, $d_0 = 0.92 \text{ cm}$, $\theta = 12.7^\circ$ (EXPB33)



Amplitude de la sous harmonique de u ($A_{1/2}(u)$)

Instabilité paramétrique dans le rayon en présence de rotation

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Structure du champ d'ondes internes

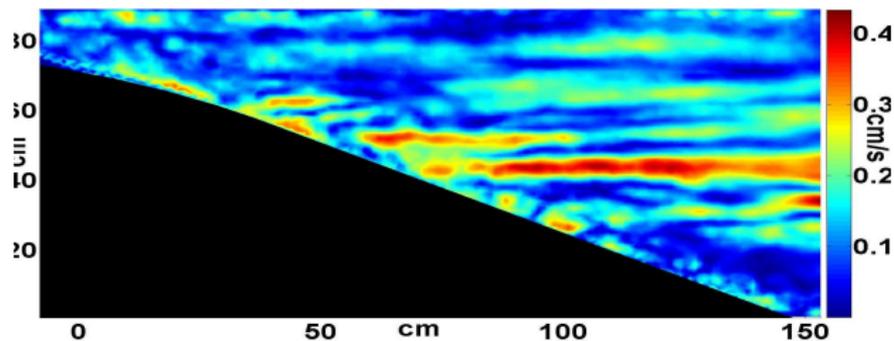
Forçage de faible amplitude

Augmentation de l'amplitude de forçage

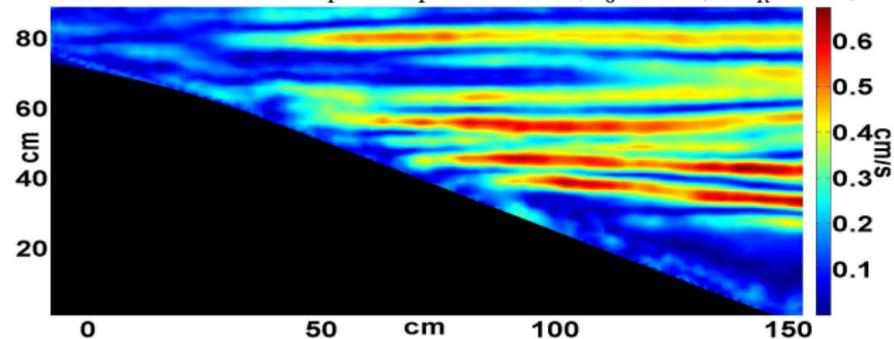
Influence de la rotation

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Calculé entre la 8ème et la 12ème période pour $T=27.79$ s, $d_0=3.1$ cm, et $T_R=130$ s (EXPB32)



Calculé entre la 26ème et la 34ème période pour $T=27.79$ s, $d_0=3.1$ cm, et $T_R=130$ s (EXPB32)

Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

**Conclusions et
perspectives**

Questions-
Réponses

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie

Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

**Conclusions et
perspectives**

Questions-
Réponses

- **Bon accord avec les résultats numériques et la théorie**

Exemple de la comparaison des champs de $A_1(u)$

Obtenu par la théorie de Hurley & Keady, par l'expérience et par le code numérique;
calculé entre la 7ème et la 9ème période

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

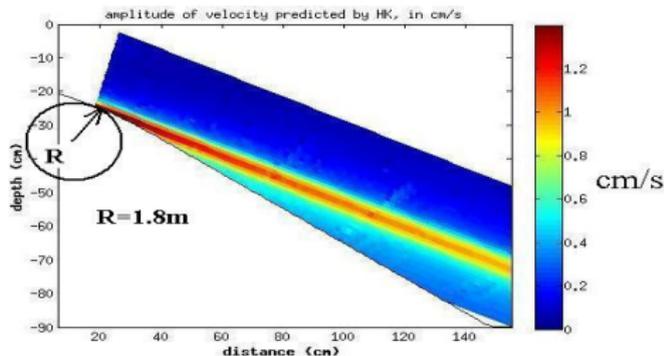
Etude numérique

Dispositif expérimental

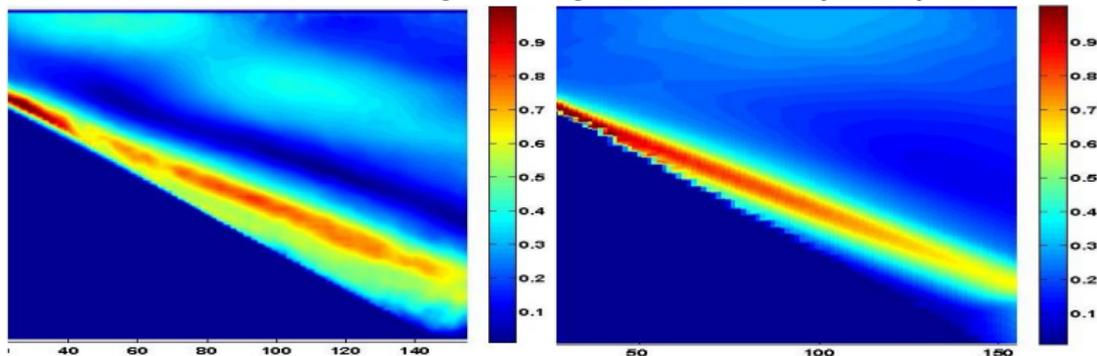
Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses



Goustiaux, Pairaud, Staquet obtenu par la théorie de Hurley & Keady



Expérience

Numérique

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- Effets de la rotation :
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- **Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique**
- Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- Effets de la rotation :
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- **Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :**
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- Effets de la rotation :
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- **Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :**
 - **L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau**
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- Effets de la rotation :
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

Conclusions

Partie expérimentale

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- **Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :**
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - **L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante**
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- Effets de la rotation :
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- **Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :**
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - **L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération**
- Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- Effets de la rotation :
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- **Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :**
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- Effets de la rotation :
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- **Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :**
 - **Augmentation de l'amplitude du courant barotrope**
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- Effets de la rotation :
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- **Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :**
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - **Augmentation de l'épaisseur du faisceau**
- Effets de la rotation :
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- **Effets de la rotation :**
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- **Effets de la rotation :**
 - **Diminution de l'épaisseur du faisceau**
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- **Effets de la rotation :**
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - **Des ondes stationnaires apparaissent plus tard**
 - Augmentation de l'amplitude de la vitesse

- Bon accord avec les résultats numériques et la théorie
- Observation des harmoniques supérieures et sous-harmonique
- Conclusion avec une faible l'amplitude d'oscillation :
 - L'amplitude du courant barotrope croît avec la fréquence d'oscillation et décroît avec la hauteur d'eau
 - L'amplitude des vitesses dans le faisceau augmente au cours du temps et revient à une valeur constante
 - L'épaisseur du faisceau augmente quand on s'éloigne de la zone de génération
- Effets de l'augmentation de l'amplitude de forçage :
 - Augmentation de l'amplitude du courant barotrope
 - Augmentation de l'épaisseur du faisceau
- **Effets de la rotation :**
 - Diminution de l'épaisseur du faisceau
 - Des ondes stationnaires apparaissent plus tard
 - **Augmentation de l'amplitude de la vitesse**

**Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.**

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

**Conclusions et
perspectives**

Questions-
Réponses

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

**Conclusions et
perspectives**

Questions-
Réponses

- Analyse des données après transformée de Hilbert

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

**Conclusions et
perspectives**

Questions-
Réponses

- Analyse des données après transformée de Hilbert
- Faire des nouvelles campagnes de mesures en tenant compte des difficultés rencontrées pendant nos expériences

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

**Conclusions et
perspectives**

Questions-
Réponses

- Analyse des données après transformée de Hilbert
- Faire des nouvelles campagnes de mesures en tenant compte des difficultés rencontrées pendant nos expériences
- Faire des expériences avec un talus tridimensionnel

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Analyse des données après transformée de Hilbert
- Faire des nouvelles campagnes de mesures en tenant compte des difficultés rencontrées pendant nos expériences
- Faire des expériences avec un talus tridimensionnel
- Développer un modèle numérique tridimensionnel et comparer les résultats avec l'expérience

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Conclusions et
perspectives

Questions-
Réponses

- Analyse des données après transformée de Hilbert
- Faire des nouvelles campagnes de mesures en tenant compte des difficultés rencontrées pendant nos expériences
- Faire des expériences avec un talus tridimensionnel
- Développer un modèle numérique tridimensionnel et comparer les résultats avec l'expérience
- Améliorer la théorie des marées internes et la comparer aux résultats expérimentaux et numériques

Propagation et
réflexion de la
marée interne:
une étude
numérique et
expérimentale.

Mahdi
MOHAMMAD
MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif
expérimental

Résultats

Conclusions et
perspectives

**Questions-
Réponses**

Questions — Réponses

Propagation et réflexion de la marée interne: une étude numérique et expérimentale.

Mahdi MOHAMMAD MAHDIZADEH

Introduction

Etude numérique

Dispositif expérimental

Résultats

Conclusions et perspectives

Questions-Réponses

Merci de votre attention

Je remercie Chantal Staquet , Joël Sommeria
et l'équipe de CORIOLIS