

# Imagerie de la structure thermohaline dans le Golfe de Cadix: Traitement des données sismiques et d'océanographie physique de la Veine d'Eau Méditerranéenne

Elise QUENTEL

Université de Bretagne Occidentale, Ecole Doctorale des Sciences de la Mer

Le 8 Mars 2010

## **Membres du jury :**

**John HUTHNANCE**, Deputy director, NERC Proudman Oceanographic Laboratory / *Rapporteur*

**Luis MATIAS**, Auxiliary Professor, Sciences Faculty of Lisbon University / *Rapporteur*

**Jean-Yves ROYER**, Directeur de Recherche CNRS, UBO / *Examineur*

**Luis PINHEIRO**, Associate Professor, University of Aveiro / *Examineur*

**Marc-André GUTSCHER**, Chargé de Recherche CNRS, UBO / *Directeur de thèse*

**Xavier CARTON**, Professeur UBO, UBO / *Co-directeur de thèse*

## Introduction

Le projet GO

Notre étude

La Sismique Océanographie

La phénoménologie dans le Golfe de Cadix

## Méthodologie en Sismique Océanographie

Comment comparer les données ?

Quelles fréquences utiliser et pour quels objets ?

## Exploitation des données historiques

Les données d'océanographie physique

Les données sismiques

## L'étude conjointe des données GO

La campagne GO

Détection des structures

Caractérisation des structures

## Conclusions et Perspectives

Conclusions

Perspectives

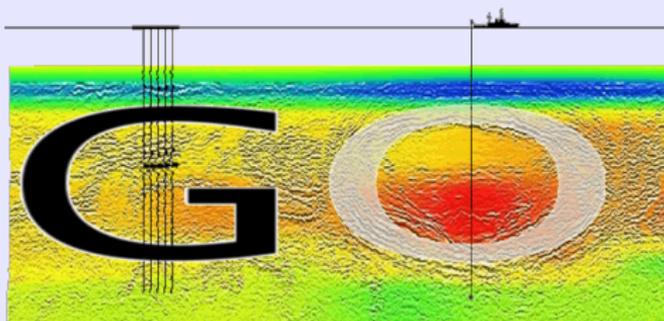
Remerciements

Références

# Introduction

# Le projet Geophysical Oceanography (GO)

- ▶ Projet européen (De Février 2006 à Septembre 2009)
- ▶ Les objectifs :
  - Étude des masses d'eau océaniques (structure thermohaline, différentes échelles) par l'océanographie physique et la sismique réflexion
  - Comprendre les évolutions détectées des masses d'eau
- ▶ Les actions
  - Exploitation du jeu de données existant sans calibration directe
  - Effectuer, traiter, analyser la campagne GO (du 17 Avril au 14 Mai 2007)



## Les objectifs

**L'objectif majeur de cette thèse est de mesurer et de décrire les processus océaniques agissant dans le Golfe de Cadix, avec une méthode novatrice.**

Dans le cadre de cette problématique nous posons les questions suivantes :

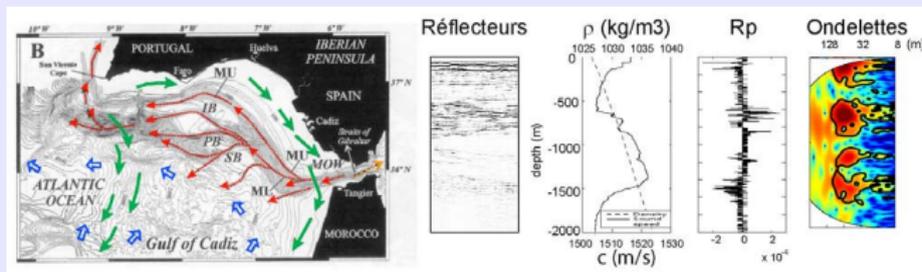
- ▶ Quels sont les structures et processus océanographiques que nous pouvons imager ?
- ▶ Quel est l'apport de l'étude des données hydrologiques et sismiques historiques ?
- ▶ Quelle est la capacité des données de sismiques marines pour détecter et caractériser les structures océanographiques ?

Et ceci dans le cadre du projet GO.

## Les outils

Pour répondre à ces questions :

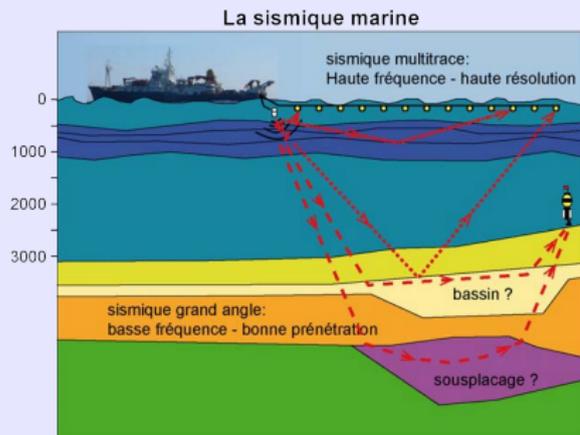
- ▶ Nous étudierons la Veine d'Eau Méditerranéenne et les structures associées par la méthode de la Sismique Océanographie.
- ▶ Nous étudierons les réflecteurs sismiques et les comparerons aux données hydrologiques.
- ▶ Nous chercherons à retrouver ces réflecteurs par le calcul d'une sismique synthétique.
- ▶ Et avec des Analyses en Ondelettes (Grinsted *et al.*, 2004), nous comparerons les positions et les longueurs d'ondes de ces réflecteurs



# La Sismique Océanographie

## Définition

La **Sismique Océanographie** est une nouvelle discipline qui allie la méthode de **sismique marine** à celles de l'**océanographie physique** dans le but d'étudier plus précisément les masses d'eau.



**Notion importante** : Un **réflecteur sismique** est une **interface** caractérisée par des contrastes d'impédance fort **limitant** deux couches stratigraphiques ou **deux masses d'eau**.

## Définition

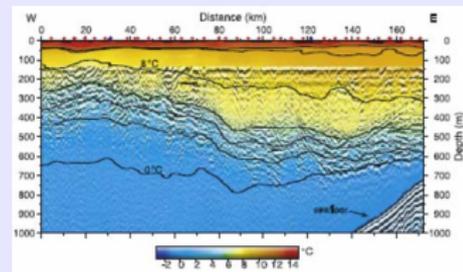
La **Sismique Océanographie** a pour but de :

- ▶ Comprendre et de suivre l'évolution des masses d'eau
- ▶ Examiner les processus de mélange et les ondes internes, et leur interaction avec les pentes continentales
- ▶ Obtenir des images à haute résolution des structures océaniques (visualisation en détail)
- ▶ Aider à monitorer la circulation océanique et les transports de chaleur

Le principe de la Sismique Océanographie est de calibrer la sismique Marine et l' Océanographie physique ensemble pour améliorer nos connaissances.

## Les premières recherches en SO

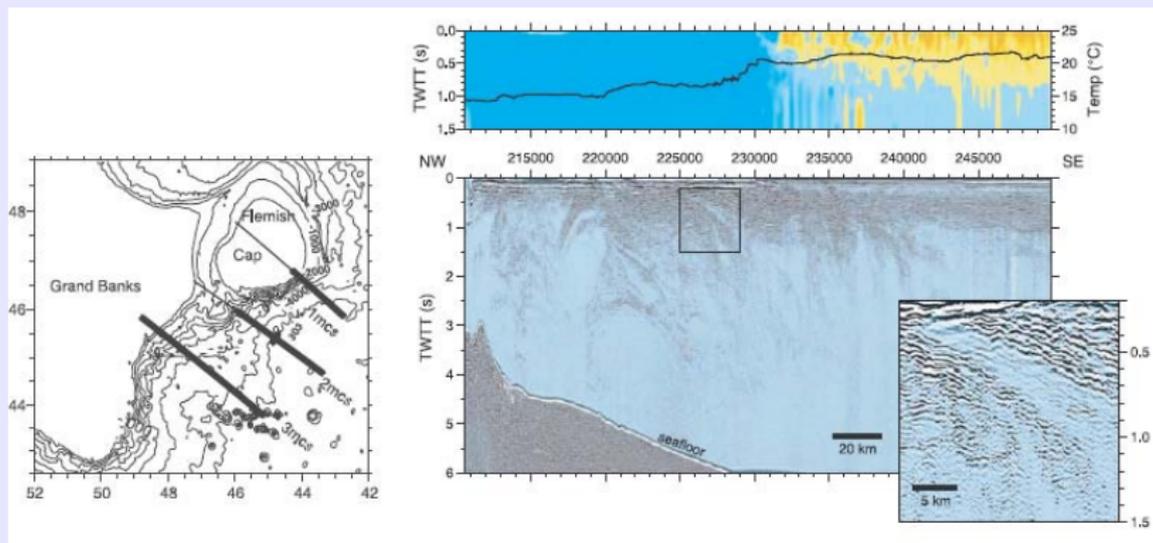
- ▶ En Atlantique-Est par Gonella et Michon (1988)
  - Profil de sismique réflexion entre 10 et 70 Hz
  - Réflecteurs entre 600 et 1500 m de profondeur
  - Ondes internes
  
- ▶ Sur le Courant du Labrador par Holbrook *et al.* (2003)
  
- ▶ Sur la Mer de Norvège par Nandi *et al.* (2004)
  - Étude conjointe de sismique réflexion et d'océanographie
  - Réflecteurs entre 0 et 700 m
  - Front entre Courant Norvégien et Eaux profondes de la Mer de Norvège
  - Les réflexions acoustiques → changements de T de 0.03°C



Extrait de Nandi *et al.* (2004)

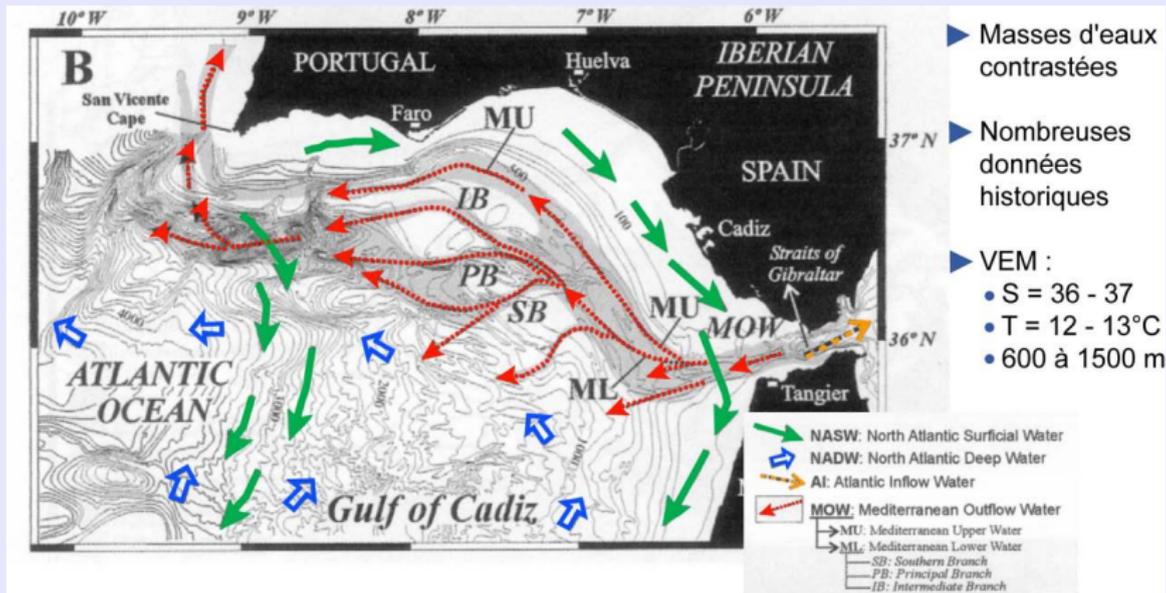
## Exemple : le Courant du Labrador

- ▶ Holbrook *et al.* (2003)
- ▶ Profils de sismique réflexion basse fréquence (qq XBT)
- ▶ Réflecteurs entre 0 et 1000 m, pendage vers l'Est
- ▶ Front chaud/froid entre Courant du Labrador et Courant Nord-Atlantique



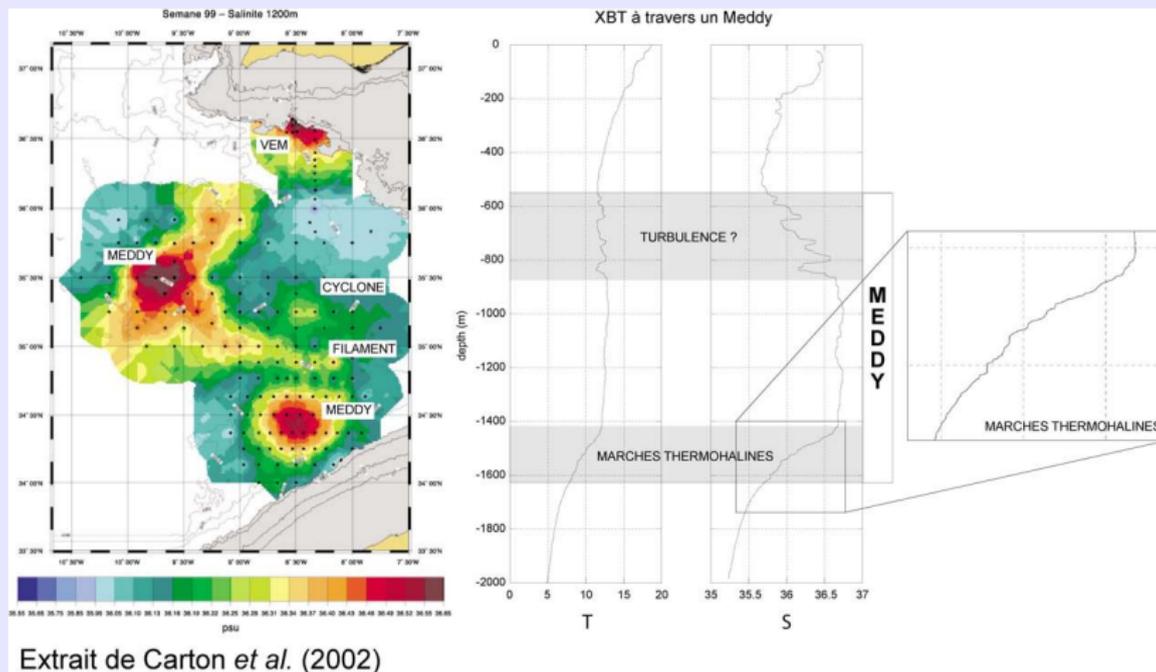
# La phénoménologie dans le Golfe de Cadix

# Le Golfe de Cadix



Extrait de Hernandez-Molina *et al.* (2003)

# Les structures



## Les structures océanographiques

Structures	Extension Horizontale	Épaisseur	Échelle	Origine
MUC	20 - 30 km	250 - 600 m	Méso-échelle	MOW
Meddies et Cyclones	40 - 150 km	600 - 1000 m	Méso-échelle	Instabilité des MUC
Filaments et SCV	10 - 40 km	100 - 300 m	Sous-méso-échelle	Instabilité des MUC ou des tourbillons
Escaliers thermohalins	qqs km	15 - 20 m	Fine-échelle	Double diffusion
Intrusions latérales	qqs 10 km	15 - 30 m	Fine-échelle	Intrusions isopycnales

# Méthodologie en Sismique Océanographie

## Comment comparer les données ?

### les données océanographiques :

- ▶ Sections d'hydrologie de plusieurs centaines de km en horizontal, et en profondeur (m).
- ▶ Sections interpolées à partir des stations océanographiques distantes de 5 km typiquement.
- ▶ Utilisation d'un profil hydrologique d'une CTD (au mieux)

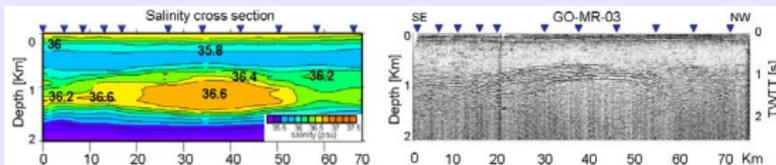
### Les données sismiques :

- ▶ Profils de plusieurs centaines de km en horizontal, et en seconde temps double en vertical.
- ▶ Stack de plusieurs traces (additionnées 2 à 2)
- ▶ Extraction d'un CDP (signal du stack en un point)

Données sismiques converties en mètres.

Avec la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'eau de mer.

$$V_{moy.} = 1500 \text{ m.s}^{-1}$$



## Limites de la comparaison

- ▶ La résolution des données
- ▶ La co-localisation
- ▶ Le temps = mouvement des eaux (Vsemirnova *et al.*, 2009)
  - Quand le mouvement des eaux est ignoré, cela perturbe les analyses des spectres de longueur d'onde.
  - L'importance d'une haute résolution est nécessaire à toute expérimentation en Sismique Océanographie.

**La campagne GO a pour but d'essayer de répondre à ces limitations**

## Le calcul de la réflectivité

Les réflecteurs des profils sismiques sont la manifestation des contrastes d'impédance acoustique le long de la colonne d'eau.

L'impédance acoustique  $I$  s'écrit :

$$I = \rho c$$

Et le gradient d'impédance  $Z$  s'écrit :

$$Z = \frac{dI}{dz} = \frac{d}{dz}(\rho c)$$

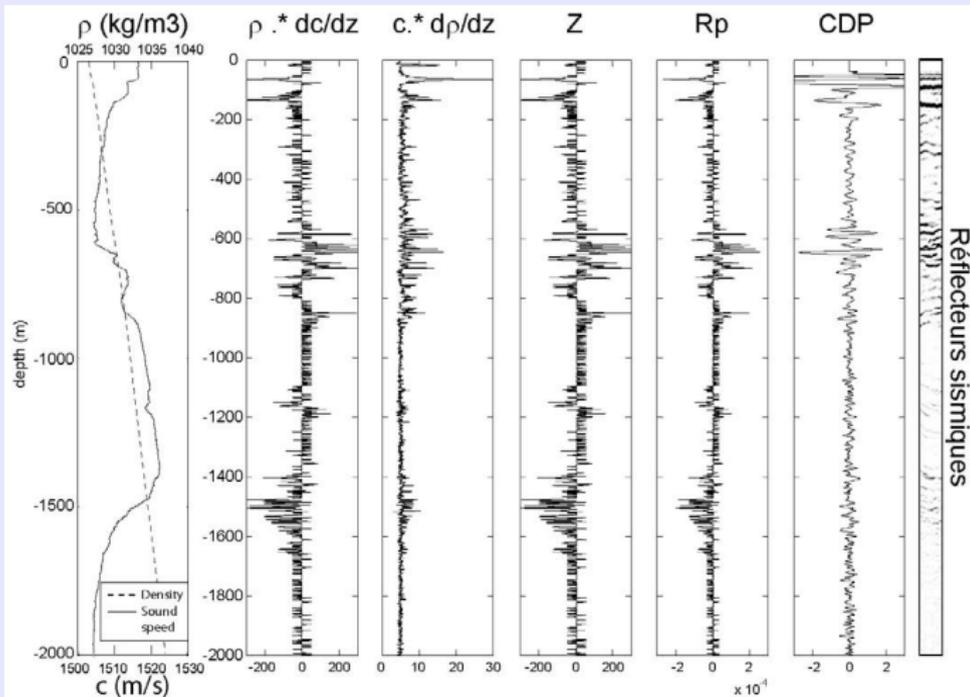
Cependant pour comparer les données hydrologiques avec les données sismiques, il nous faut connaître la réflectivité.

**La définition de la réflectivité** s'écrit :

$$R_p = \frac{1}{c} \frac{dc}{dz} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} = \frac{Z}{I}$$

Nous utiliserons cette dernière équation pour calculer une sismique synthétique à partir des données d'hydrologie.

# La réflectivité synthétique



- ▶  $dc/dz \approx 90\%$  de  $Z$
- ▶  $dp/dz \approx 10\%$  de  $Z$

- ▶ Sallares *et al.* (2009)

- 80%  $R_p = \Delta T$
- 20%  $R_p = \Delta S$
- 40% au sommet de la MW

## L'analyse en ondelettes 1/3

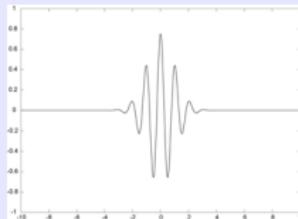
- ▶ Elle permet de déterminer à la fois la position et la longueur d'onde
- ▶ Méthode de Grinsted *et al.* (2004), Continuous Wavelet Analysis, Ondelette mère = Morlet
- ▶ L'ondelette mère est définie par :

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{1}{2}\eta^2}$$

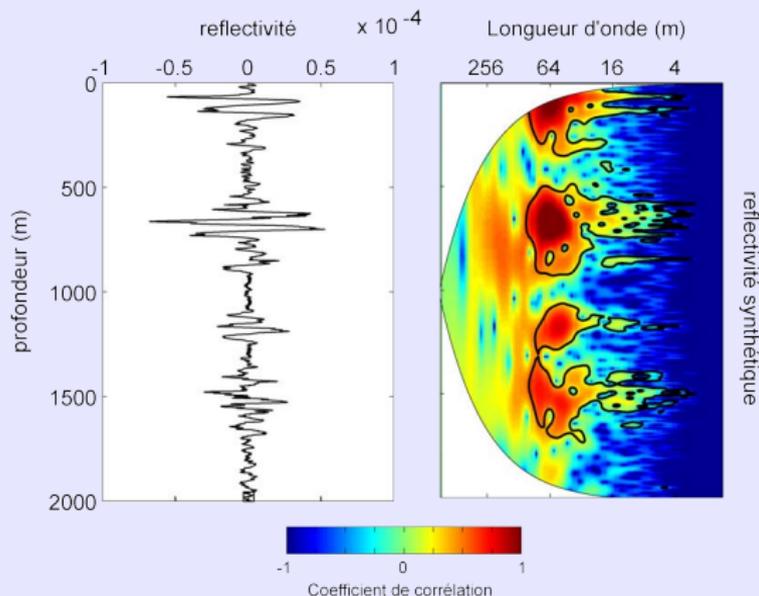
Où  $\omega_0$  représente la longueur d'onde verticale

Et  $\eta$  représente la profondeur.

- ▶  $\omega_0 = 6m$  pour un équilibre entre la détermination des profondeurs et des longueurs d'onde.



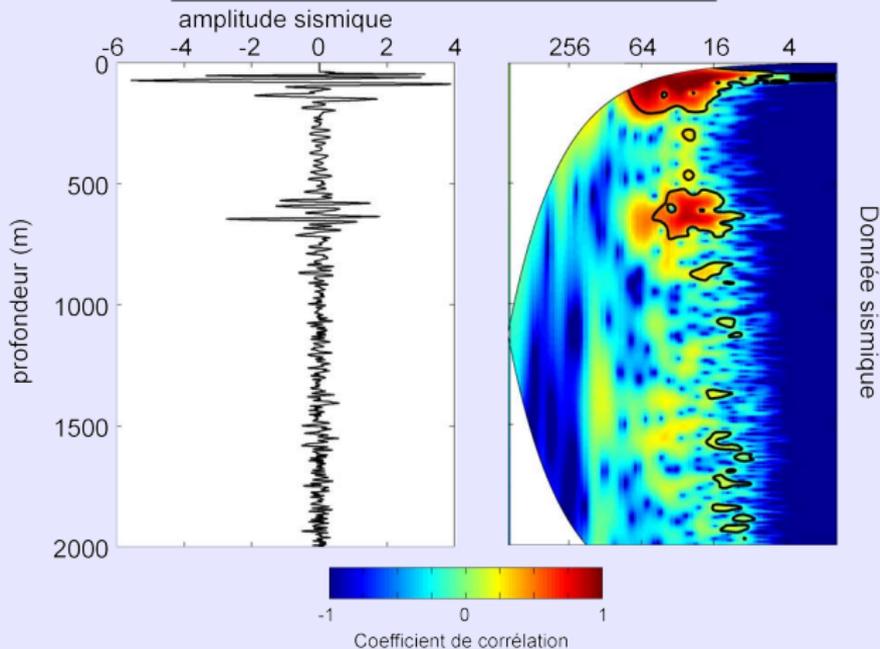
## L'analyse en ondelettes 2/3



- ▶ Rouge + contour noir = Corrélation
- ▶ En blanc (COI) = limite de la méthode
- ▶ Fortes amplitudes = signal remarquable en longueur d'onde
- ▶ Profondeur = position
- ▶ Longueur d'onde = extension verticale

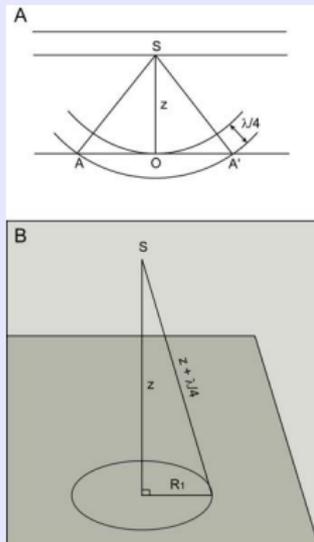
## L'analyse en ondelettes 3/3

## Exemple sur un CDP extrait du stack



# Quelles fréquences utiliser et pour quels objets ?

## La zone de Fresnel



extrait de Sheriff (1996) ,  
de Yilmaz (1987) et de  
Monk (2009, 2010)

- ▶ Résolutions sismiques évaluées par  $\lambda$ .
- ▶ **Résolution verticale** =  $\frac{\lambda}{4}$   
(longueur d'onde dominante du signal).
- ▶ **Résolution horizontale** décrite par la **Zone de Fresnel**.
  - Aire circulaire centrée sur le point de réflexion où les ondes interfèrent et sont constructives entre-elles : First Fresnel Zone. (Sheriff, 1996 ; Monk, 2010)
  - Rayon de la première zone de Fresnel en un point de réflexion théorique :

$$R \approx \sqrt{\frac{z \lambda}{2}} \approx \frac{V}{2} \sqrt{\frac{t}{f}}$$

selon Sheriff (1980)

$z$  = distance surface / point de réflexion

$V$  = vitesse de propagation des ondes

$t$  = temps d'arrivée en sec temps double

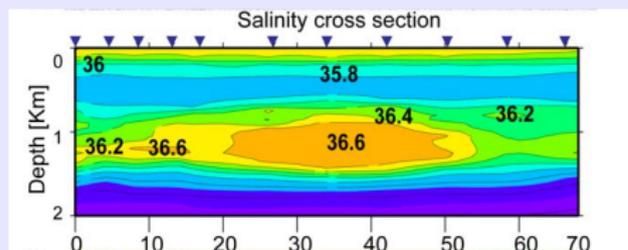
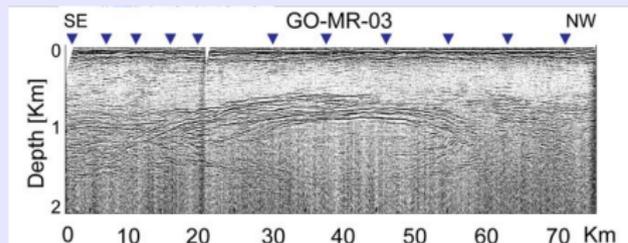
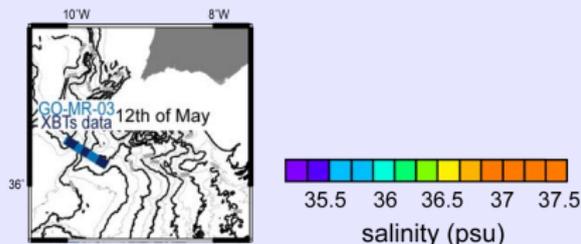
$f$  = la fréquence

## Les résolutions connues

- ▶ Les profils de sismiques réflexions
  - Horizontale : 12,5 m (couverture du système d'acquisition)
  - Verticale : entre 2,5 et 10 m varie en fonction de la fréquence utilisée
- ▶ Les sections océanographiques
  - Horizontale : typiquement 5 km
  - Verticale : < 1 m (dépend de l'outil d'acquisition)

**Les profils de sismique réflexion ont une meilleure résolution horizontale.**

**Oui ! Mais qu'en est-il vraiment ?**



## Calcul des résolutions

Pour des réflecteurs à :

$z = 1000$  m de profondeur = profondeur moyenne de la MW.

et  $V = 1500$  m.s<sup>-1</sup> = vitesse des ondes acoustiques dans l'eau de mer.

▶ **Pour les profils sismiques LF**, fréquence utile  $\approx 40$  Hz

• **Verticale**

$$\lambda = \frac{V}{f} = 37,5 \text{ m}$$

$$R_v = \frac{\lambda}{4} = \mathbf{9,4 \text{ m}}$$

• **Horizontale**

$$R_h \approx \sqrt{\frac{z \lambda}{2}} \approx \mathbf{137 \text{ m}}$$

▶ **Pour les profils sismiques HF**, fréquence utile  $\approx 200$  Hz

• **Verticale**

$$\lambda = \frac{V}{f} = 7,5 \text{ m}$$

$$R_v = \frac{\lambda}{4} = \mathbf{1,9 \text{ m}}$$

• **Horizontale**

$$R_h \approx \sqrt{\frac{z \lambda}{2}} \approx \mathbf{61 \text{ m}}$$

L'intérêt de la LF est l'énergie de l'onde acoustique, qui nous permet de mieux distinguer les réflecteurs.

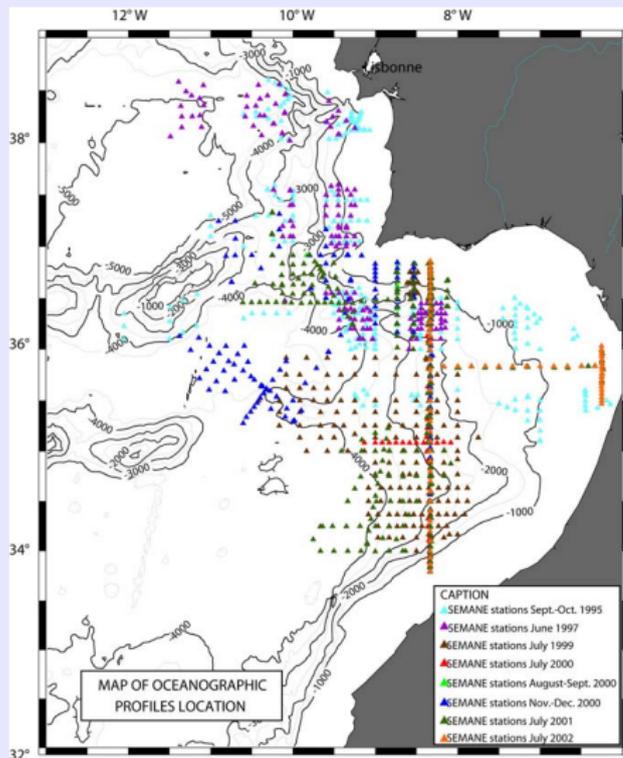
## Les structures océanographiques

Structures	Extension Horizontale	Épaisseur	Échelle	Origine
MUC	20 - 30 km	250 - 600 m	Méso-échelle	MOW
Meddies et Cyclones	40 - 150 km	600 - 1000 m	Méso-échelle	Instabilité des MUC
Filaments et SCV	10 - 40 km	100 - 300 m	Sous-méso-échelle	Instabilité des MUC ou des tourbillons
Escaliers thermohalins	qqs km	15 - 20 m	Fine-échelle	Double diffusion
Intrusions latérales	qqs 10 km	15 - 30 m	Fine-échelle	Intrusions isopycnales

Les données sismiques (HF et LF) sont capables d'imager les structures océanographiques à toutes les échelles.

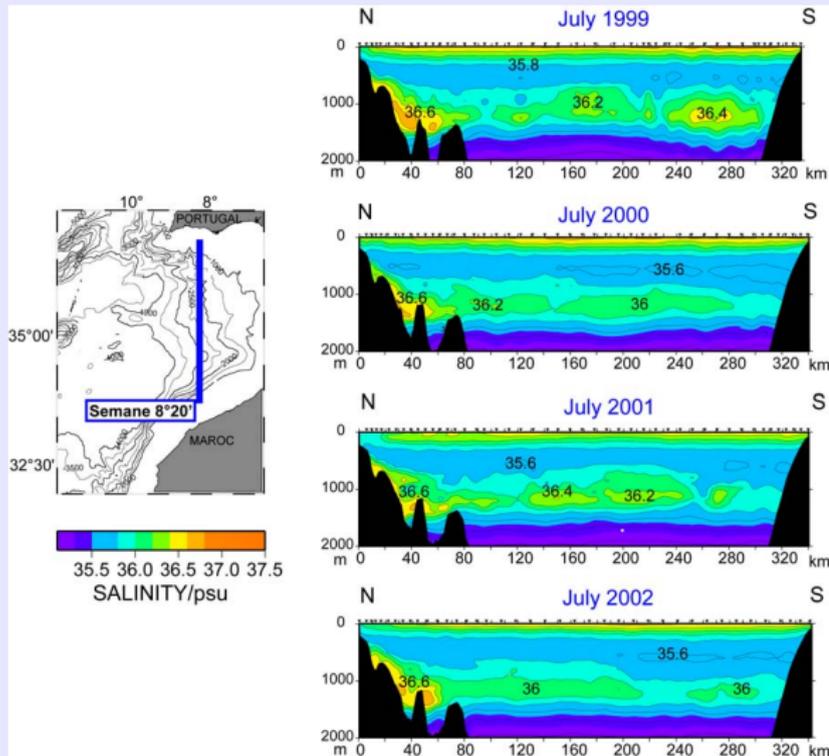
# Exploitation des données historiques

## Les campagnes SEMANE



- ▶ Campagnes de 1995 à 2002
- ▶ Données hydrologiques : CTD, XBT et XCTD
- ▶ Une grande radiale 8°20'W

## Les sections de salinité

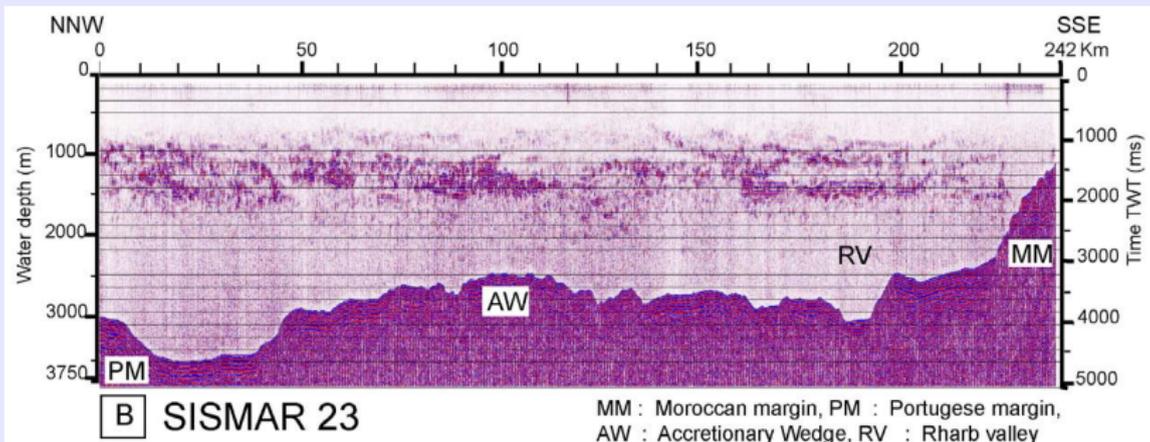


- ▶ Panache : 800 - 1600 m
- ▶ S : 36 et 36,4
- ▶ 36,6 pour VEM
- ▶ Variation de l'extension de la VEM
- ▶ **Variations entre les années**
- ▶ **Mais caractéristiques permanentes**

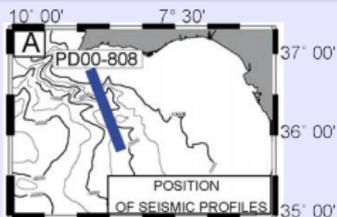
## Le profil SISMAR 23



- ▶ Zone réfléchive : 800-1700 m de profondeur
- ▶ Panache de MW
- ▶ Zones transparentes intercalées



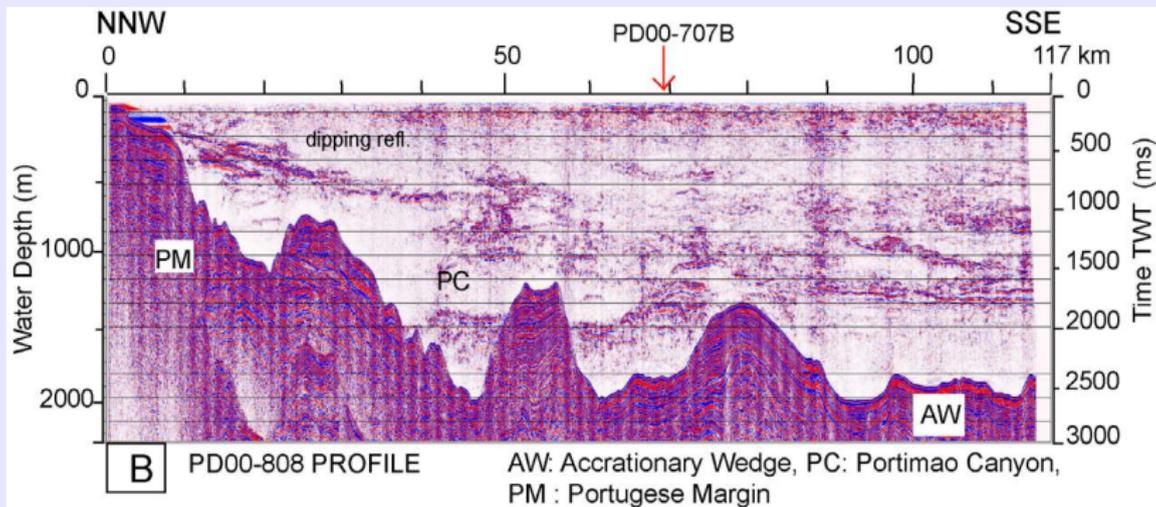
## Le profil TGS NOPEC PD00-808 (2001)



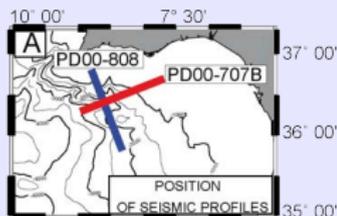
▶ **Veine d'Eau Méditerranéenne**

▶ **Processus d'instabilités**

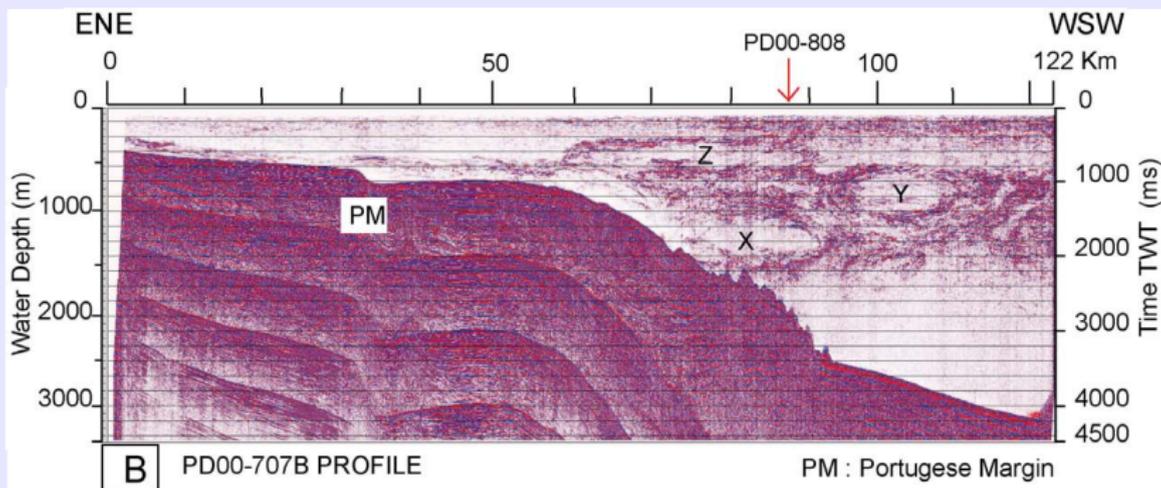
▶ **Alternance de zones réfléchives, transparentes + réflecteurs pentés**



## Le profil TGS NOPEC PD00-707B(2001)



- ▶ Lentilles transparentes, limites fortes et continues
- ▶ Réflecteurs entre 0-1700 m



## Discussion

Les réflecteurs sismiques :

- ▶ imagent le panache de MW entre 700 et 1700 m de profondeur
- ▶ sont de forte amplitude en-dessous et faible au-dessus de la MW (SISMAR)
- ▶ sont d'amplitude équivalente pour TGS NOPEC
- ▶ distinguent les structures méso-échelle et sous-méso-échelle de la colonne d'eau

**Mais sans calibration avec les données océanographiques, on ne peut pas conclure sur l'origine des structures océanographiques**

# L'étude conjointe des données GO

## La campagne GO



- ▶ Du 19 Avril au 14 Mai 2007
- ▶ Entre Canyon de Portimão et Plaine Abyssale de Horseshoe
- ▶ **Données co-localisées et acquises simultanément**
- ▶ On va pouvoir calibrer nos données efficacement

Nous allons chercher à détecter et caractériser les structures à toutes les échelles avec ces nouvelles données.

## Les données GO

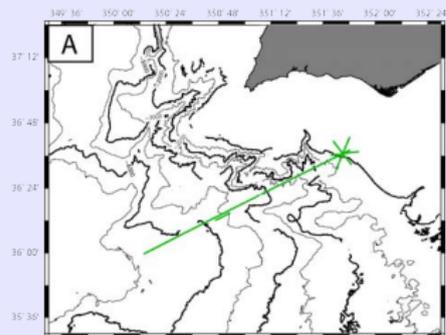
### Leg 1 (du 19 au 22 Avril)

- ▶ 24 profils HR (sismique IFREMER)
- ▶ 145 XBT
- ▶ 22 XCTD
- ▶ 7 CTD

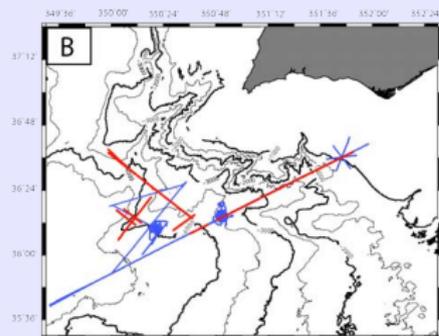
### Leg 2 (du 29 Avril au 14 Mai)

- ▶ 14 profils LR
- ▶ 2 x 8 profils MR
- ▶ 370 XBT
- ▶ 8 XCTD
- ▶ 43 CTD (R/V Poseidon)
- ▶ distant de 12 km (30 min.)

LEG 1 - Profils HR

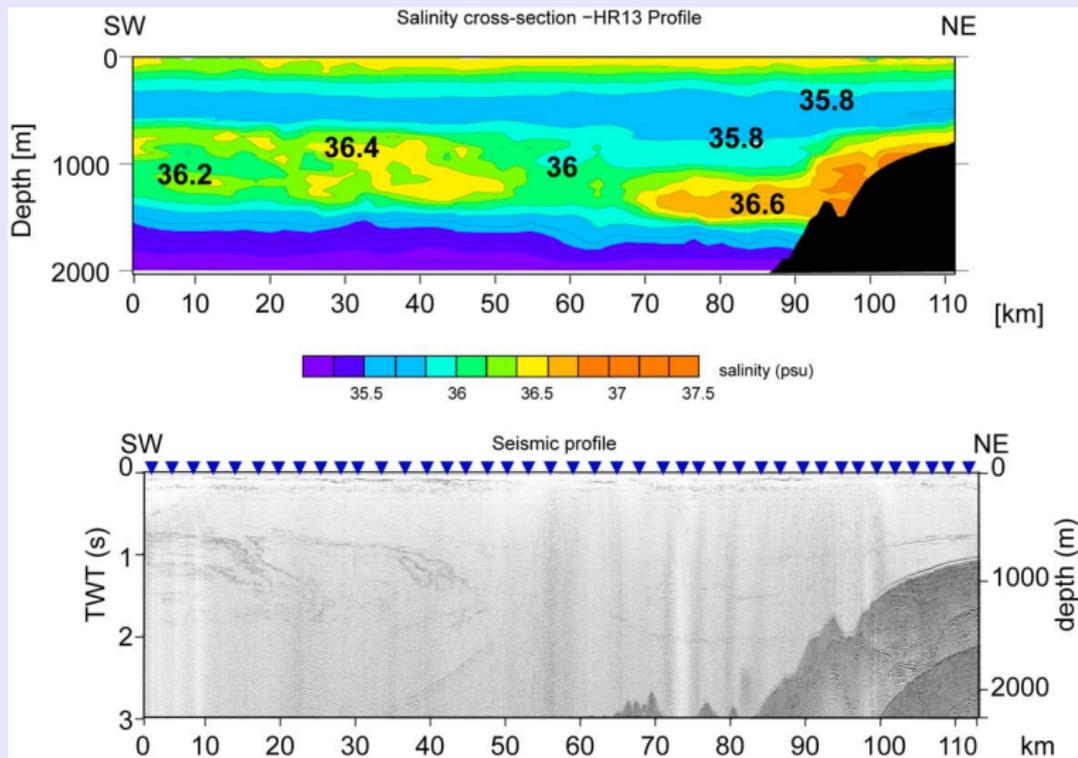


LEG 2 - Profils LR et MR

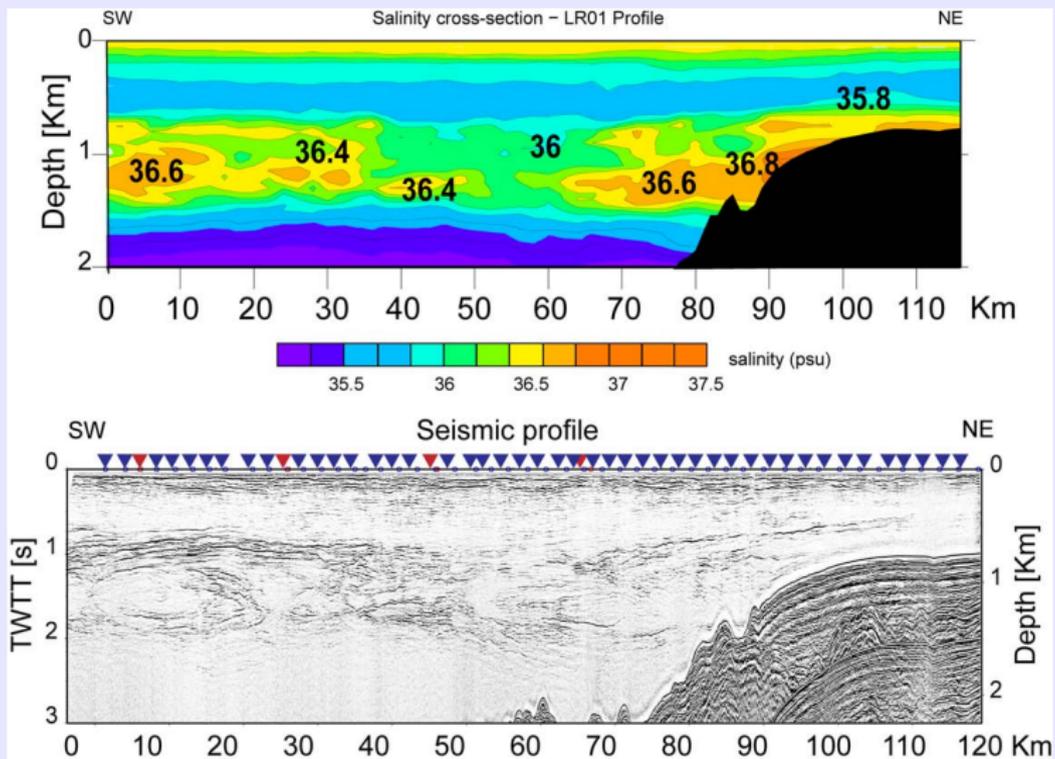


# Détection des structures

# Les données haute fréquence



## Les données basse fréquence



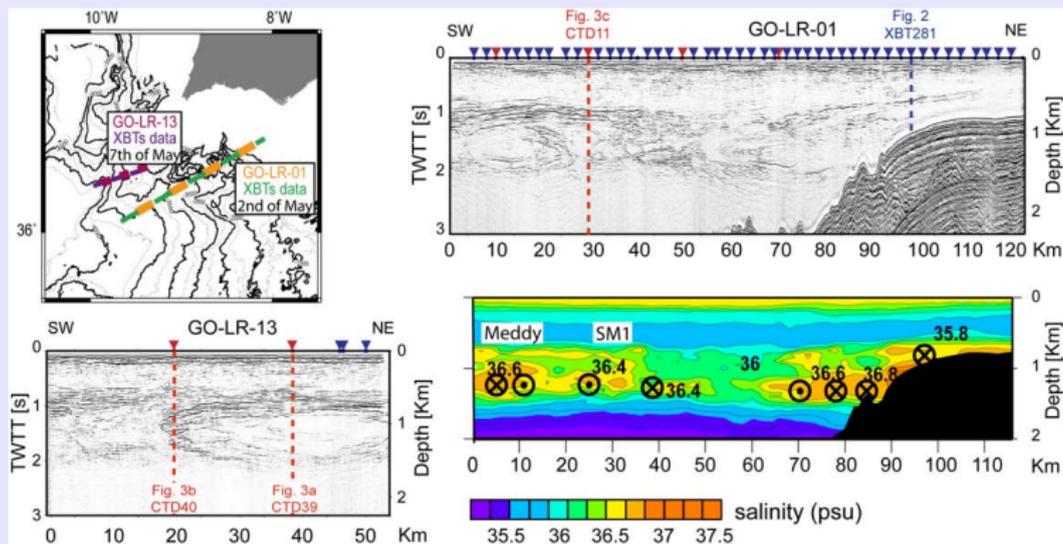
## Discussion

- ▶ Les réflexions correspondent exactement à des variations des paramètres physiques
- ▶ Les profils sismiques et les sections de salinité sont comparables

**Les structures méso-échelle, sous-méso-échelle et fine échelle sont détectables par les données sismiques HR et LR**

# Caractérisation des structures

# Les structures étudiées



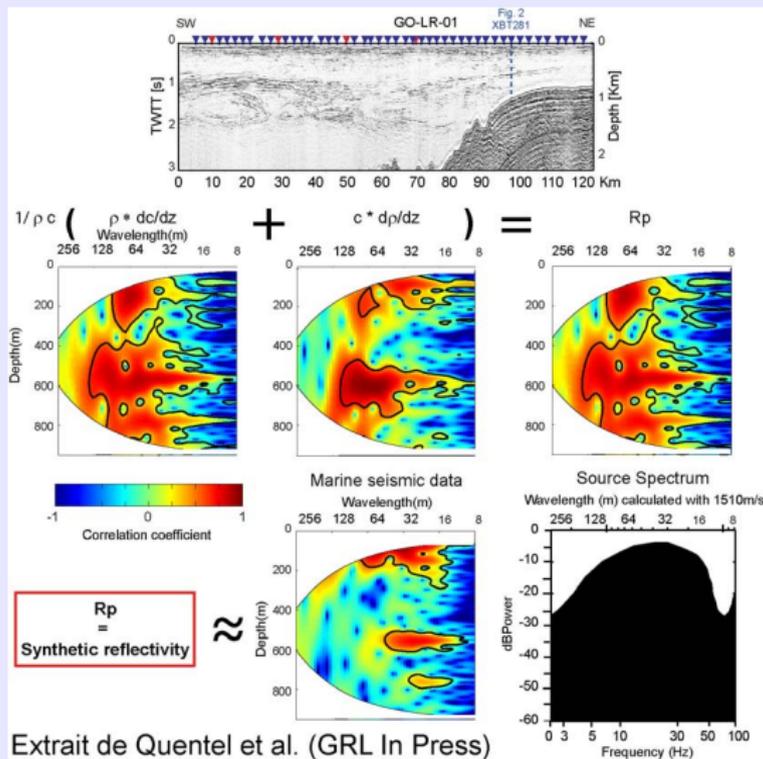
Extrait de Quentel *et al.* (GRL In Press)

## Les données

- ▶ Profils sismiques LR traités par IFM-GEOMAR
- ▶ Données filtrées entre 4 et 8 Hz (passe bande, Butterworth)
- ▶ Choix de CDP associés à des stations CTD
- ▶ Calcul de la réflectivité synthétique
- ▶ Application du filtre des données sismiques
- ▶ Application de l'analyse en ondelettes
- ▶ On va chercher à caractériser les structures rencontrées à toutes les échelles, par les données sismiques et hydrologiques (MW, meddy, tourbillons, intrusions latérales et marches thermohalines).

**Est-ce que les données sismiques nous permettent de caractériser ces structures aussi bien que les données hydrologiques ?**

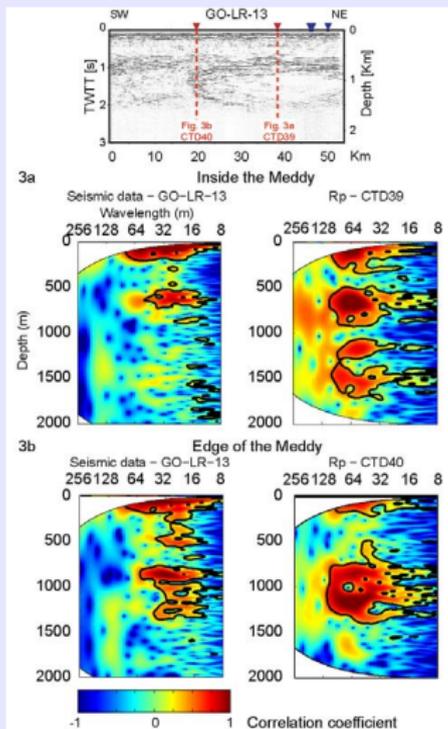
# La Veine d'Eau Méditerranéenne



Extrait de Quentel et al. (GRL In Press)

- ▶  $\rho \frac{dc}{dz} \approx R_p$
- ▶ Thermocline
  - 30-200 m d'épaisseur
  - 16-100 m de  $\lambda_v$
- ▶ MW
  - 300-900 m d'épaisseur
  - 16-128 m  $\lambda_v$
- ▶ Réflecteurs moins puissants
- ▶ Ondelette source 40 Hz

# Le meddy



Extrait de Quentel et al. (GRL In Press)

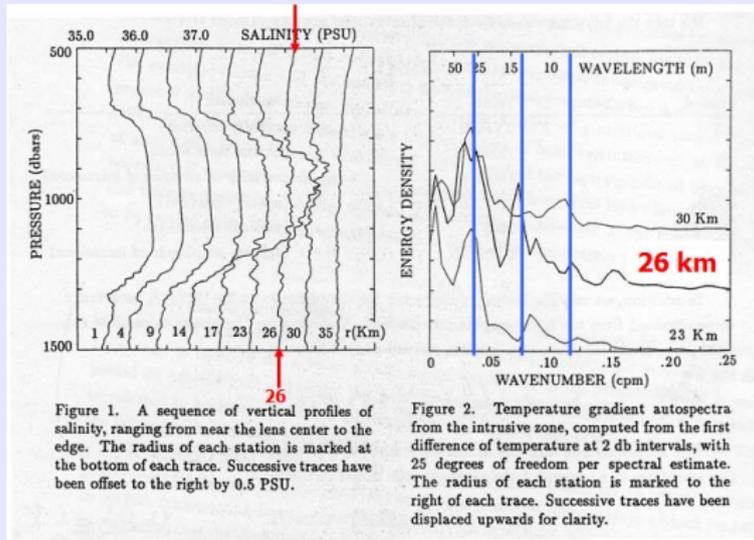
## Centre du meddy :

- ▶ Structures entre 0-300 m, 500-900 m, 1200-1700 m
- ▶  $\lambda_v$  : entre 8-128 m
- ▶ Données sismiques moins d'informations à la base du meddy

## Bordures du meddy :

- ▶ Structures entre 0-200 m, 700-1400 m
- ▶  $\lambda_v$  : entre 8-128 m
- ▶ Données sismiques montrent les mêmes structures

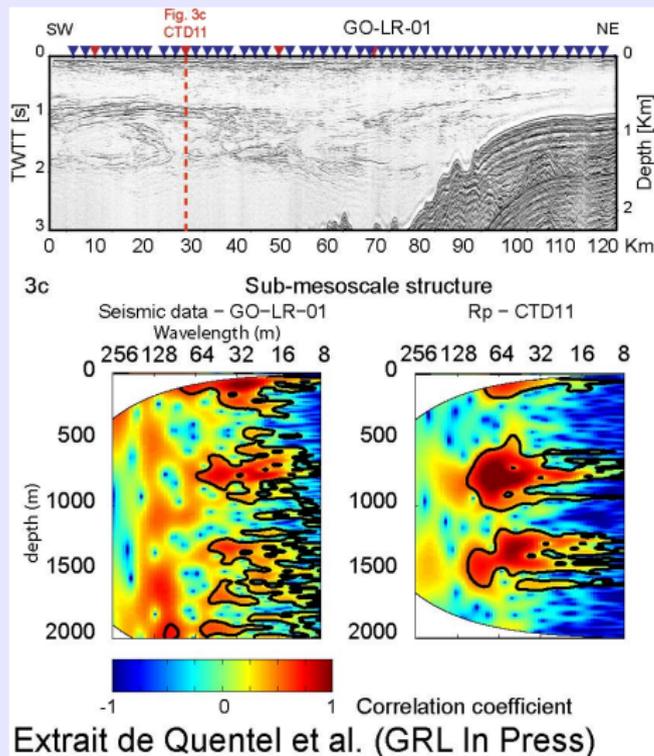
## Les intrusions latérales



Extrait de Ruddick et Hebert (1988)

Les bordures d'un meddy sont caractérisées par des intrusions latérales en raison de leur longueur d'onde caractéristiques.

# La structure sous-mésos-échelle



- ▶ Structures entre : 0-200 m, 500-1100 m et 1300-1700 m
- ▶  $\lambda_v$  entre 8-128 m
- ▶ Réflecteurs continus entre 500-2000 m
- ▶  $\lambda_v$  entre 8-64 m
- ▶ La réflectivité synthétique montre mieux les contrastes

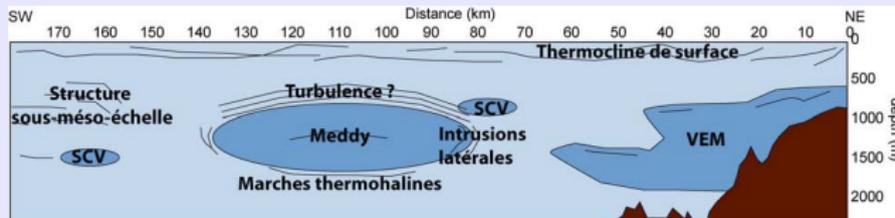
# Conclusions et Perspectives

## Conclusions 1/3

Nous avons mis en évidence :

- ▶ Forts réflecteurs au-dessus de la VEM sur la pente continentale
- ▶ Meddy clairement identifié dans les données sismiques et océanographiques
  - Forts réflecteurs au-dessus du meddy
  - Bordures des couches homogènes (Menesguen *et al.*, 2009)
  - Réflecteurs plus continus aux bordures
  - Intrusions thermohalines
- ▶ Les structures sous-méso-échelle peuvent être visualisées comme un meddy
- ▶ Toutes les structures océanographiques sont détectées et caractérisées en  $\lambda_v$  et  $z$

# Conclusions 2/3



Structure	Position	$\lambda_v$	Réflectivité	Réflecteurs
Thermocline de surface	0 - 200 m	8 - 64 m	Forte	Continus sur 100 km
VEM sup.	600 m	16 - 32 m	Moyenne	Continus sur 10 km, pentés
Structure sous-mésoscale	Dans le panache	8 - 128 m	Forte	Continus, pentés
SCV	Dans le panache	16 - 64 m	Forte	Continus, pentés
Meddy	700 - 1500 m	$\lambda_v$ 8 - 256 m, $\lambda_h$ 1 - 16 km, $\lambda_h$ 1 - 4 km	Forte	Continus, pentés
Intrusions latérales	Bord du Meddy	8, 16, 32 et 64 m	Forte	pentés
Turbulence ?	Sommet du Meddy	16 - 64 m	Forte	Continus sur 60 km
Marches thermohalines	Base du Meddy	16 m	Faible	discontinus

Les structures de bases et du sommet du meddy sont décrites dans Menesguen *et al.* (2009).

## Conclusions 3/3

Nous avons montré que :

- ▶ Les données sismiques doivent être associées à des données hydrologiques **co-localisées dans l'espace et dans le temps**
- ▶ Les données sismiques ont une meilleure résolution horizontale (**entre 61 m et 137 m**) que les données hydrologiques
- ▶ Les données océanographiques doivent être filtrées avec le filtre sismique pour être comparables
- ▶ La thermocline est perturbée par l'effet de l'onde directe

## Perspectives

- ▶ Il nous faut encore améliorer le calcul de la réflectivité pour notre étude conjointe des données
  - Appliquer une convolution aux données hydrologiques pour les comparer aux données sismiques
  - Ou bien, lors du traitement sismique, faire une déconvolution
- ▶ Faire une étude méthodologique pour enlever au mieux l'effet de l'onde directe dès l'acquisition
- ▶ Les données sismiques vont nous permettre de faire un suivi spatio-temporel des structures océanographiques
- ▶ Étude des structures océanographiques dans d'autre région (thermocline) : Front de Ouessant (*thèse en cours*)
- ▶ Un intérêt plus lointain serait l'étude des upwelling dans un but halieutique

Merci à tous

- Ambar, I., L. Armi, A. Bower, and T. Ferreira (1999)**, Some aspects of time variability of the mediterranean water off south portugal, *Deep-Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 46, 1109-1136.
- Gonella, J., and D. Michon (1988)**, Ondes internes profondes révélées par sismique réflexion au sein des masses d'eau en atlantique-est, *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, 306(11), 781-787.
- Grinsted, A., J. C. Moore, and S. Jevrejeva (2004)**, Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(5/6), 561-566.
- Hernandez-Molina, J., E. Llave, L. Somoza, M. C. Fernandez-Puga, A. Maestro, R. Leon, T. Medialdea, A. Barnolas, M. Garcia, V. Diaz del Rio, L. M. Fernandez-Salas, J. T. Vazquez, F. Lobo, J. M. Alveirinho Dias, J. Rodero, and J. Gardner (2003)**, Looking for clues to paleoceanographic imprints : A diagnosis of the gulf of cadiz contourite depositional systems, *Geology*, 31(1), 19-22.
- Holbrook, W. S., P. Paramo, S. Pearse, and R. W. Schmitt (2003)**, Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling, *Science*, 301(5634), 821-824.
- Menesguen, C., B. L. Hua, C. Papenberg, D. Klaeschen, L. Geli, and R. Hobbs (2009)**, The effect of bandwidth on seismic imaging of rotating stratified turbulence surrounding an anticyclonic eddy from field data and numerical simulations., *Geophysical Research Letters*, 36, L00D05, doi :10.1029/2009GL039951.
- Monk, D. J. (2009)**, Fresnel zone binning : Application to 3d seismic fold and coverage assessments, *The Leading Edge*, 28(3), 288-295, doi :10.1190/1.3104072.
- Monk, J., David (2010)**, Fresnel-zone binning : Fresnel-zone shape with offset and velocity function, *Geophysics*, 75(1), T9-T14, doi :10.1190/1.3294576.
- Nandi, P., W. S. Holbrook, S. Pearse, P. Paramo, and R. W. Schmitt (2004)**, Seismic reflection imaging of water mass boundaries in the norwegian sea, *Geophysical Research Letters*, 31, L23,311.
- Quentel, E., X. Carton, M.-A. Gutscher, and R. Hobbs (In Press)**, Detecting and characterizing mesoscale and submesoscale structures of mediterranean water from joint seismic and hydrographic measurements in the gulf of cadiz, *Geophysical Research Letters*.
- Ruddick, B., and D. Hebert (1988)**, The mixing of meddy "sharon", in *Small-Scale Turbulence and Mixing in the Ocean*, edited by E. Science, pp. 249-262, J.C.J. Nihoul and B.M. Jamart.
- Sallares, V., B. Biescas, G. Buffett, R. Carbonell, J. J. Danobeitia, and J. L. Pelegri (2009)**, Relative contribution of temperature and salinity to ocean acoustic reflectivity, *Geophysical Research Letters*, 36, L00D06, doi :10.1029/2009GL040187.
- Sheriff, R. E. (1980)**, Nomogram for fresnel-zone calculation, *Geophysics*, 45(5), 968-972, doi :10.1190/1.1441101.
- Sheriff, R. E. (1996)**, Understanding the fresnel zone, *AAPG Explorer*, October.
- Vsemirnova, E., Hobbs, R.W., Serra, N., Klaeschen, D., and Quentel, E. (2009)**, Estimating internal wave spectra using constrained models of the dynamic ocean, *Geophysical Research Letters*, 36, L00D07, doi :10.1029/2009GL039598.
- Yilmaz, z. (1987)**, Seismic data processing, *Investigations in Geophysics, vol. 2*, society of exploration geophysics ed., Stephen M. Doherty, Tulsa.