

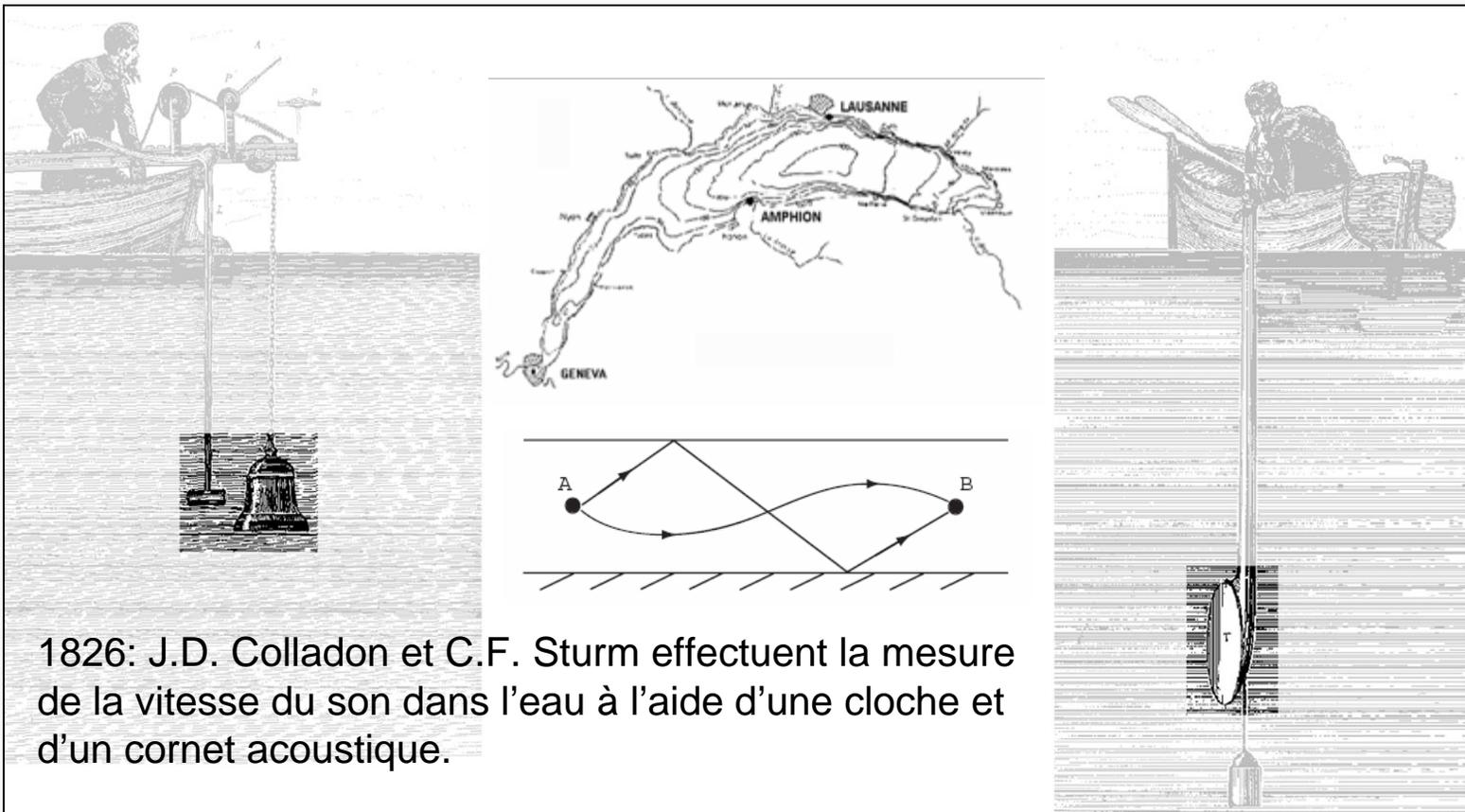


Tomographie Acoustique du Léman

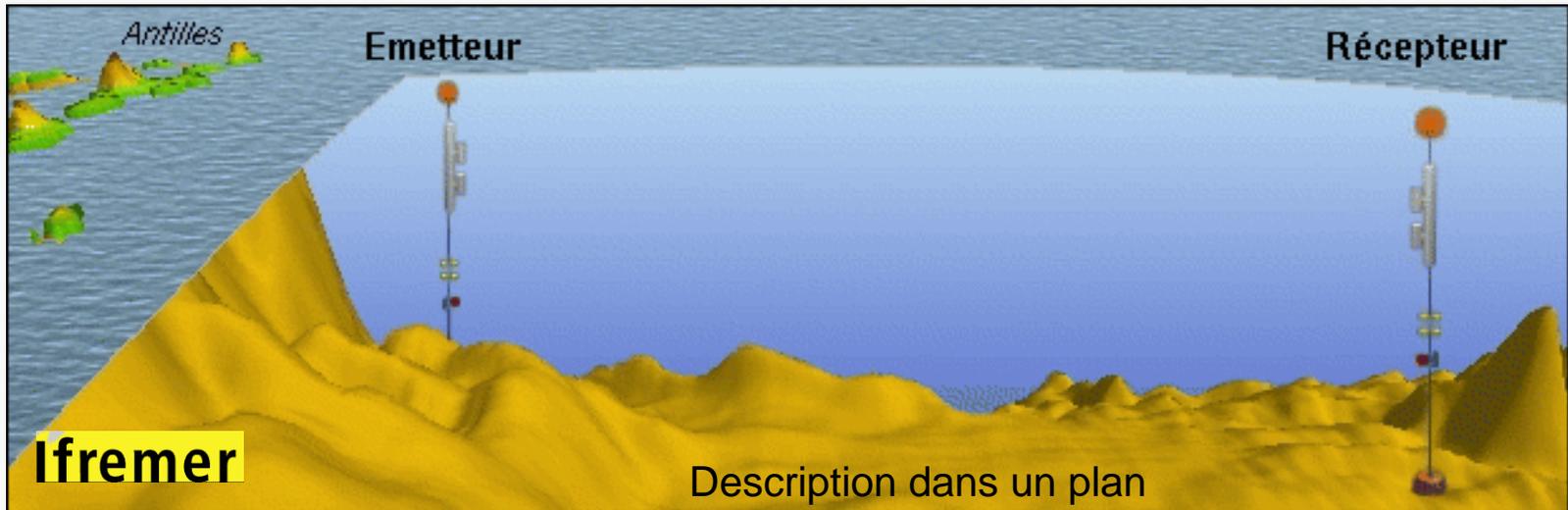
Xavier Falourd – Thèse EPFL n°3171 (2004)

Tomographie acoustique du Léman

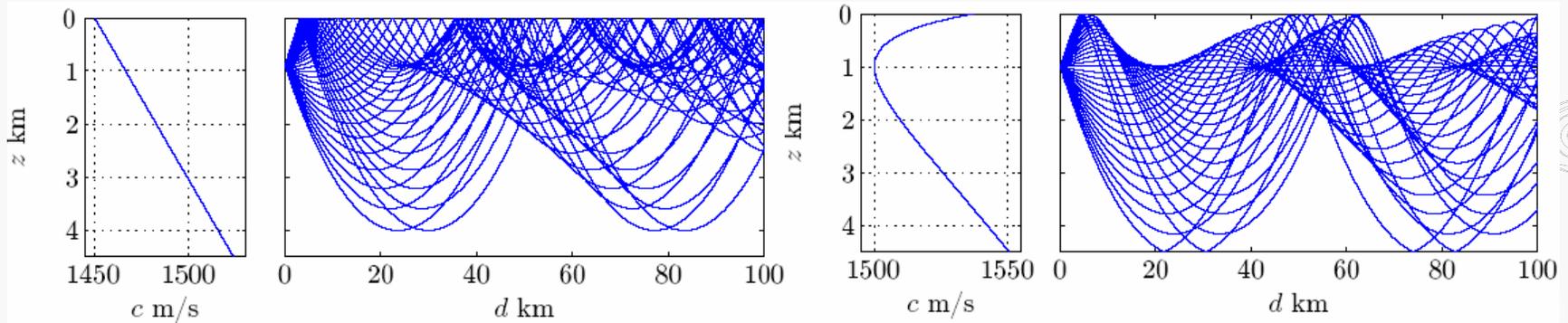
La vitesse du son C dépend de la température T , de la pression P et de la salinité Sa . La mesure précise des différents temps de trajet des ondes acoustiques entre deux sites permet de déterminer la vitesse C et donc les paramètres T , P et Sa .



Tomographie acoustique des océans



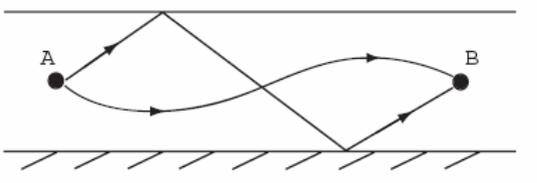
Profils et représentations de la propagation en zones polaire et tempérée



Tomographie acoustique des océans

Problème direct : soit les champs de célérité c et de courant u connus, considérant les caractéristiques de la source, calculer la structure du signal au récepteur.

Problème inverse : soit le signal émis $e(t)$ et le signal reçu $r(t)$ connus, calculer les propriétés du milieu de propagation c et/ou u .



rayons en réception

$$(\hat{\alpha}_p, \hat{\tau}_p, \hat{\theta}_p)$$

$$\tau_p^\pm = \int_{\Gamma_p^\pm} \frac{ds}{c(z) \pm u(z)}$$

température

$$s_p = \int_{\Gamma_p} \frac{ds}{c},$$

courant u

$$d_p = - \int_{\Gamma_p} ds \frac{u}{c^2}$$



Océans et mers

ATOC,
INTIMATE,
NPAL,
THETIS, ...



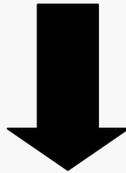
Les grands lacs profonds



Tomographie acoustique du Léman

Observer la stratification thermique : rayonnement solaire et mélange

Détecter et identifier les ondes internes : rotation de la Terre, vent



Étude et synthèse:

- limnologie physique : stratification et ondes internes
- propagation du son en milieu hétérogène fluctuant
- traitement du signal : estimation, détection, suivi

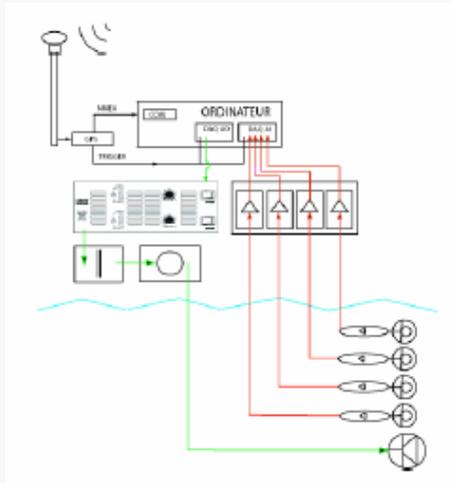
Expérience hivernale :

- tomographie 2D sur l'axe Lausanne – Amphion
- découplage température / courant

Le Léman

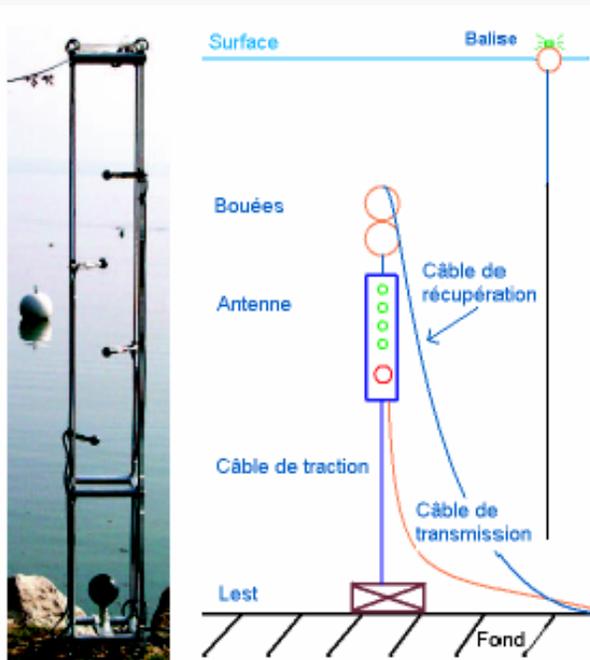
Altitude de la surface du Léman : 372 m
Surface : 580 km²
Volume : $8,9 \cdot 10^{10}$ m³
Profondeur maximale : 310 m
Profondeur moyenne : 153,4 m
Longueur : 72,3 km
Temps de résidence de l'eau : 11,4 ans

Dispositif tomographique 2D \leftrightarrow



Station terrestre:

- Antenne GPS : référence de temps
- Ordinateur : acquisition et génération des signaux
- Amplificateur de puissance et circuits électriques
- Pré-amplificateurs et amplificateurs

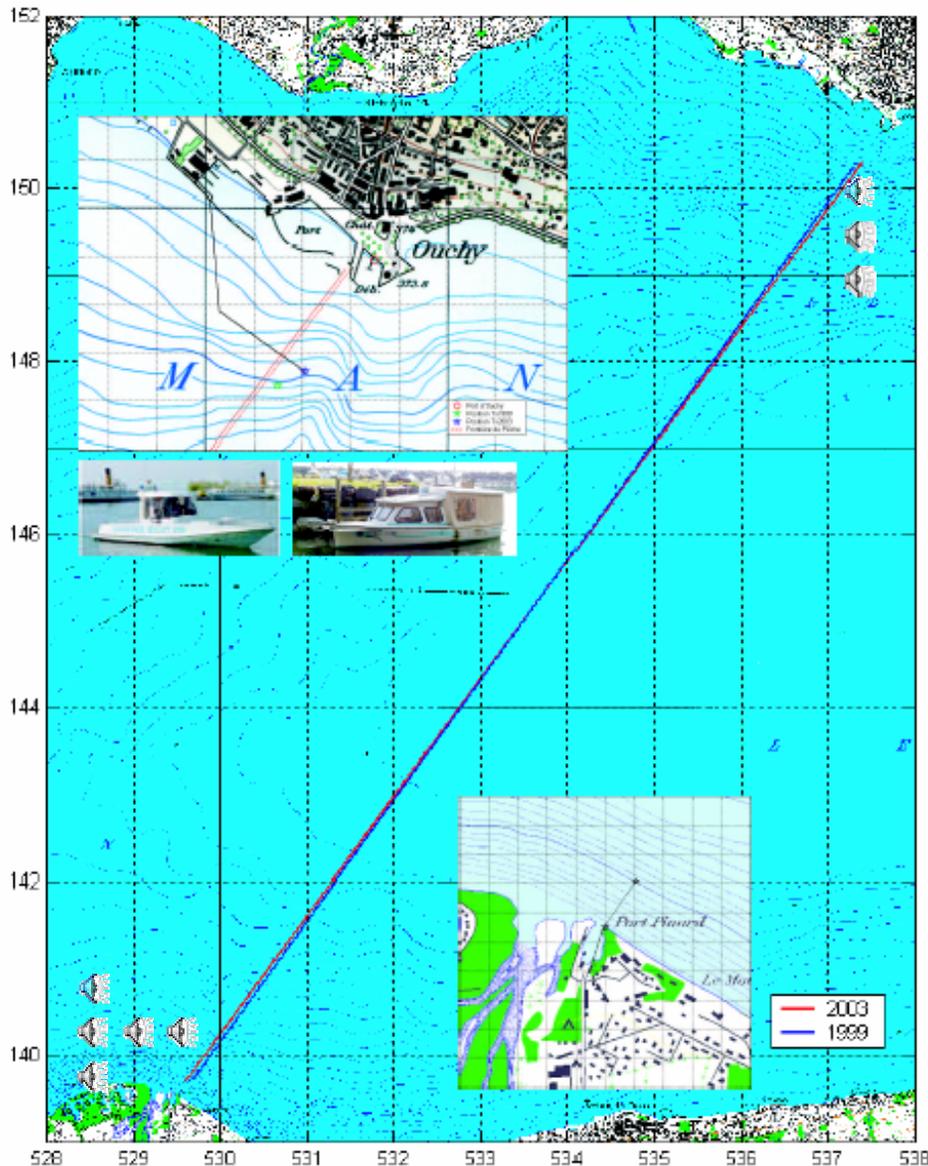


Emetteur / Récepteur immergé:

- Bouées de traction
- Réseau de 4 hydrophones préamplifiés et un émetteur
- Lest

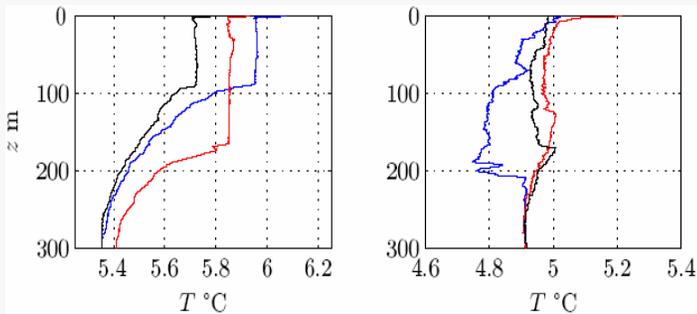
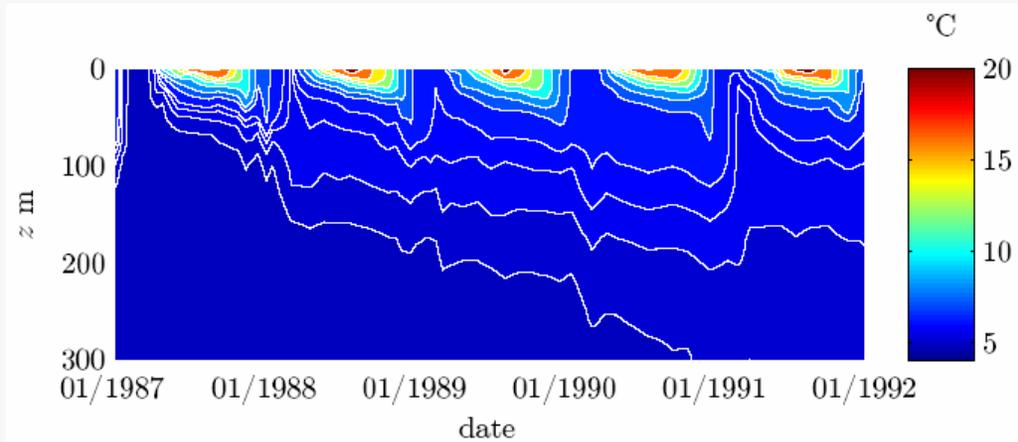
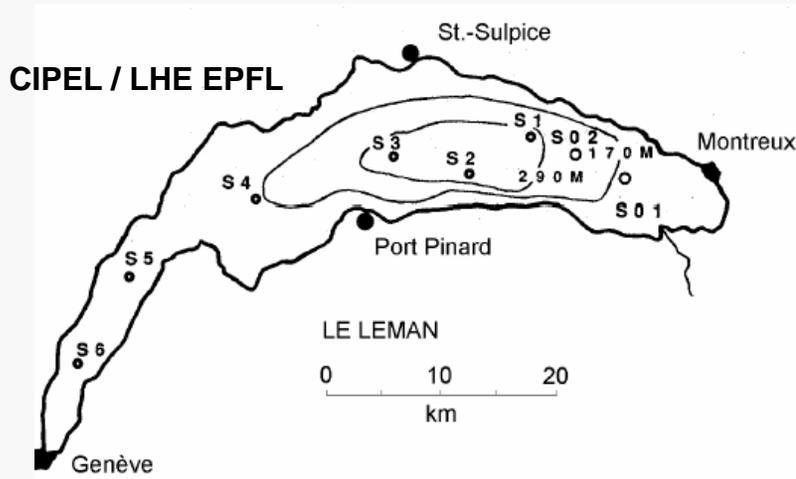


Sites de sondage : Lausanne - Amphion

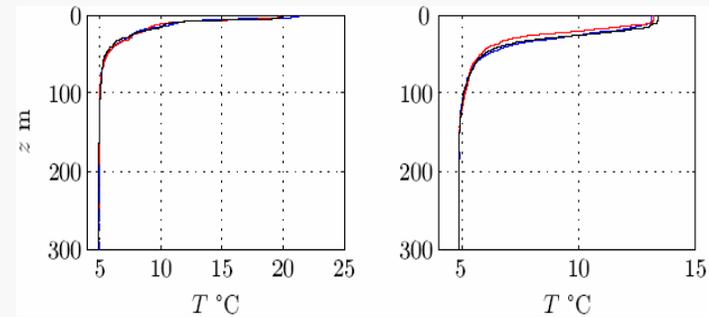


- Pulsation monotonale
- Rampe linéaire en fréquence
- Sinus à modulation binaire de phase
- Equation du sonar
 - Niveau de la source
 - Niveau de bruit ambiant
 - Perte de propagation
 - Gain de traitement
- Dimensionnement du signal
 - Longueur du signal $\sim 0,5$ s
 - Bande utile : 10-16 kHz
 - **Résolution : ~ 150 microseconde**
- Sondage toutes les 5 minutes
- Propagation Lausanne \leftrightarrow Amphion simultanée
- **Disposition des sites et pêche**

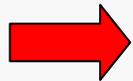
Cycle de stratification thermique du Léman



Structures bathythermiques quasi-homothermes stables ou non.



Structures bathythermiques tempérées à deux ou trois couches.

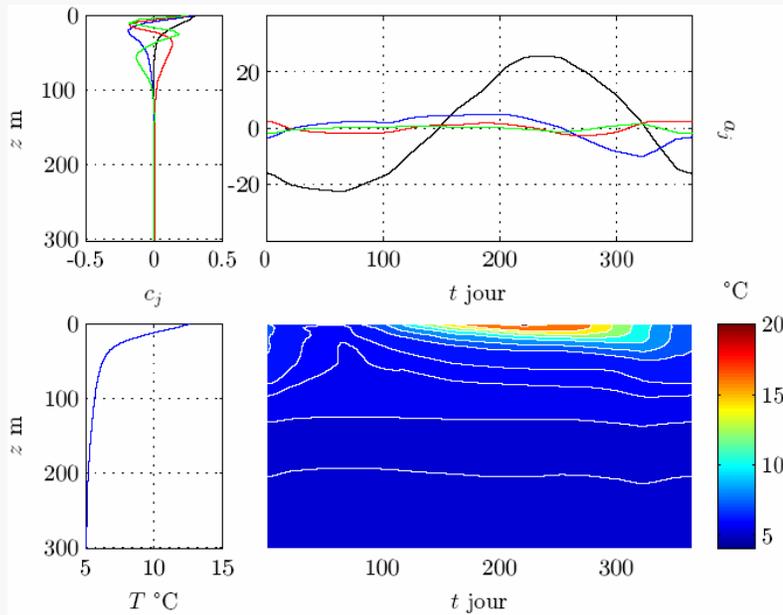


Calendrier modèle de stratification thermique pour la recherche de perturbation dans le problème inverse

Modèle de stratification thermique

Décomposition en fonctions empiriques orthogonales:

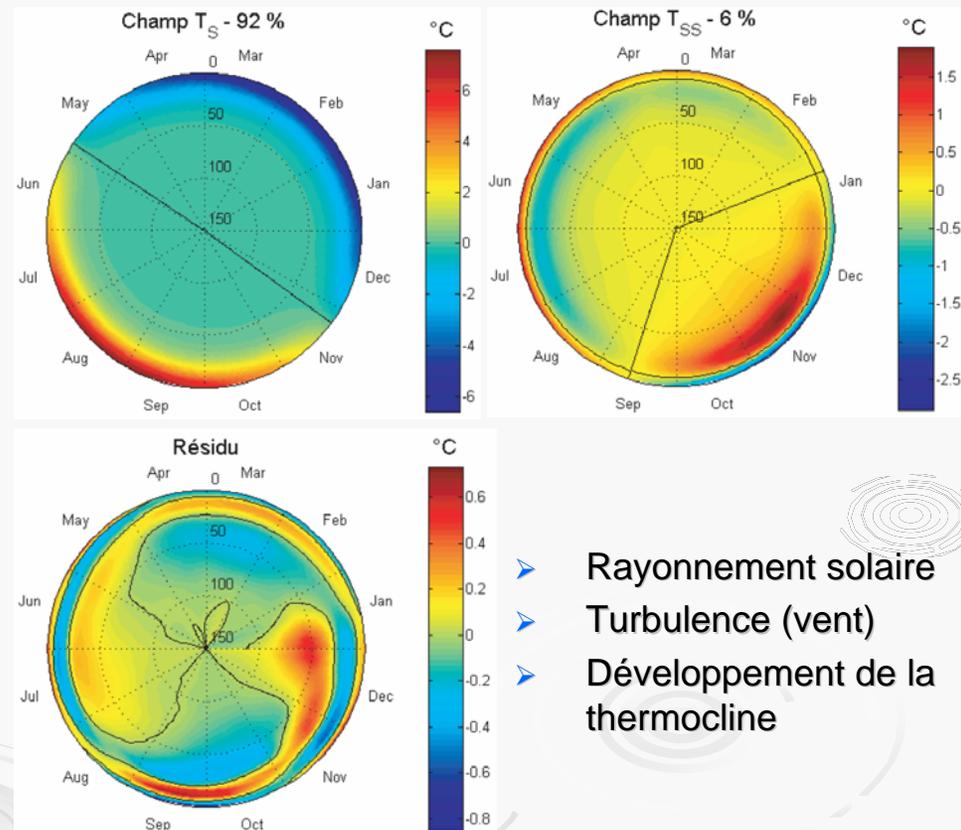
$$\mathbf{T}(-) = \sum_{j=1}^J \vec{a}_j \vec{c}_j$$



Cycle de stratification décrit par 4 fonctions

Fonction	1	2	3	4
Ratio (%)	92,43	6,49	0,83	0,20

Champs de température relatifs



- Rayonnement solaire
- Turbulence (vent)
- Développement de la thermocline

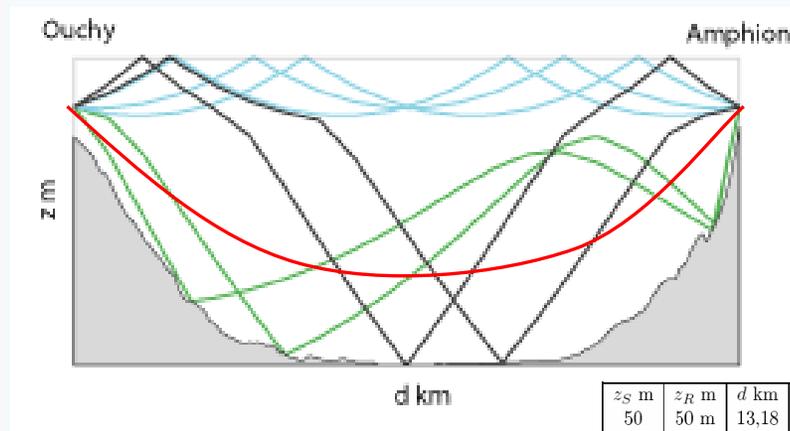
$$T_{0,a} = 12,576 \text{ °C}$$

$$T_{z,a} = 5,082 \text{ °C}$$

Straskraba

Analyse du problème direct

trajectoire des rayons pour une stratification hivernale



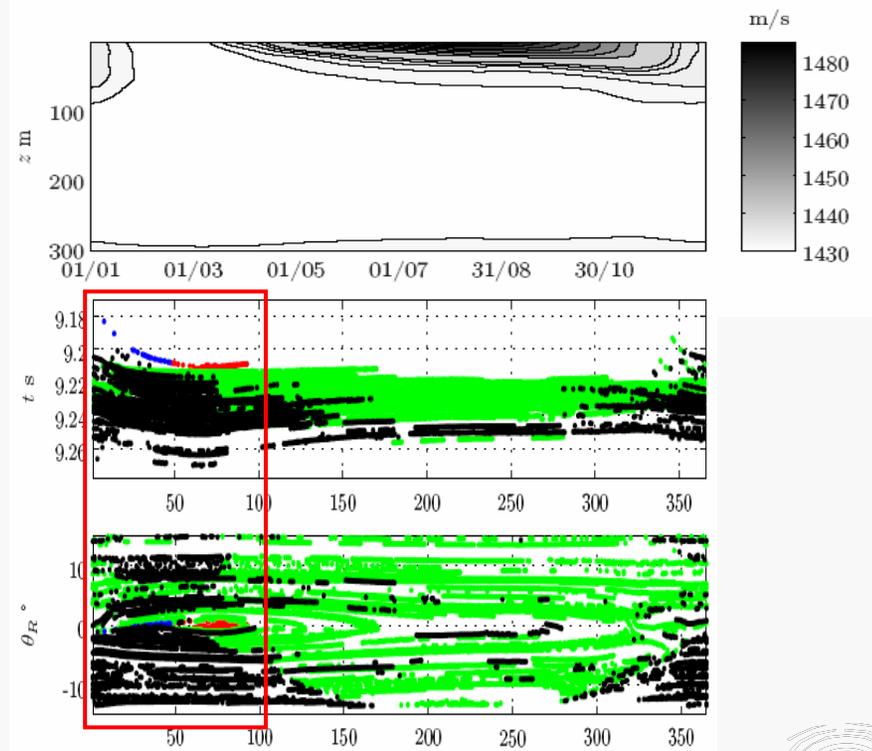
RR : réfracté dans la colonne d'eau

R-SR: réfracté et réfléchi par la surface

R-BR : réfracté et réfléchi par le fond du lac

SR-BR : réfléchi par la surface et le fond

Modèle du champ de célérité annuel du Grand Lac



Difficulté: Identification des trajets en bassin lacustre fluctuant

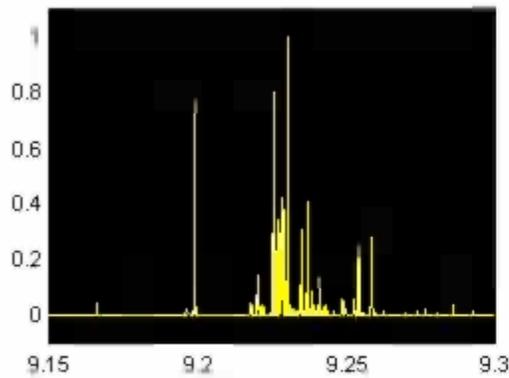
Validation de la méthode

Confronter les mesures aux modèles pour le scénario le plus simple : analyse de la propagation pour la période de refroidissement hivernal.

Estimation des temps de propagation

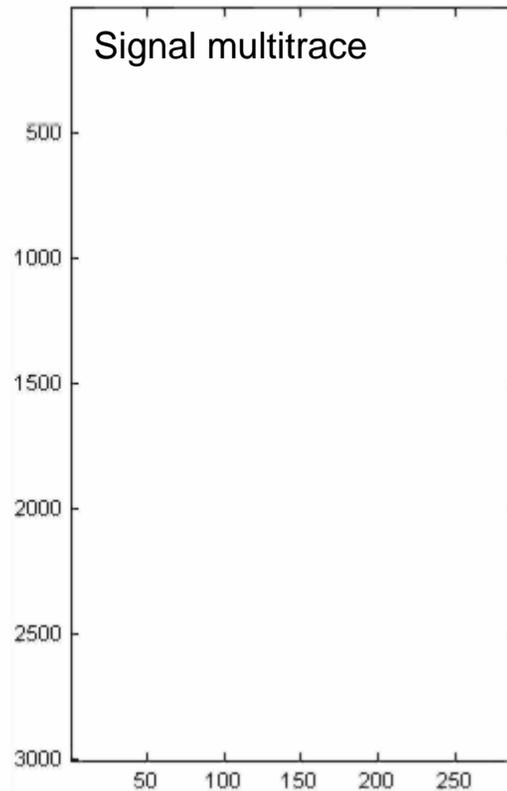
L'estimation des temps de propagation est obtenue par corrélation entre le signal émis et le signal reçu.

Signal monotrace



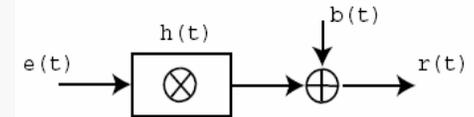
23-Dec-2003 16:00:09

Signal multitrace



N° de sondages

Modèle



$$r(t) = (h * e)(t) + b(t)$$

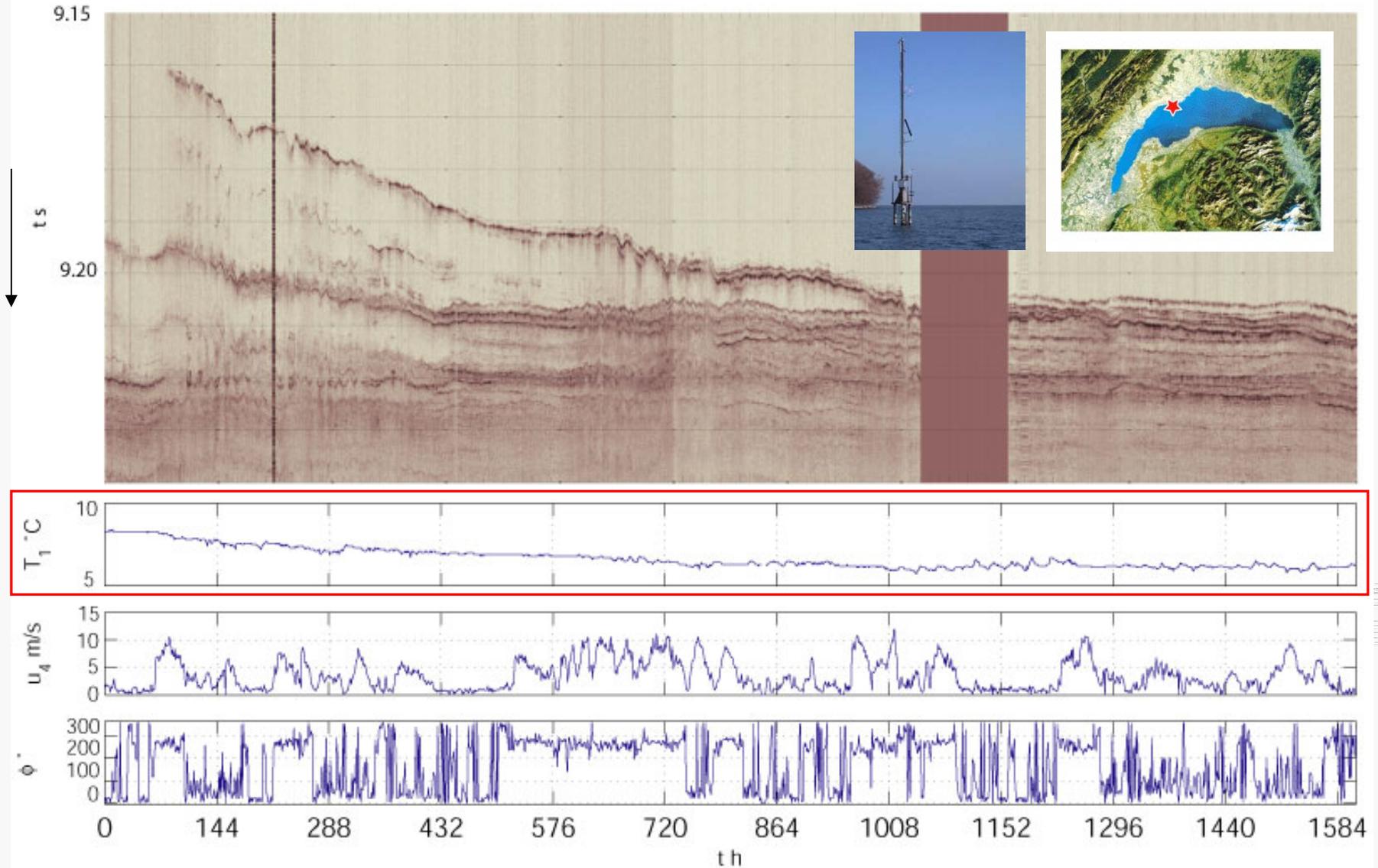
$$h(t) = \sum_{p=1}^P \alpha_p \delta(t - \tau_p)$$

$$r(t) = \sum_{p=1}^P \alpha_p e(t - \tau_p) + b(t)$$

Détection active

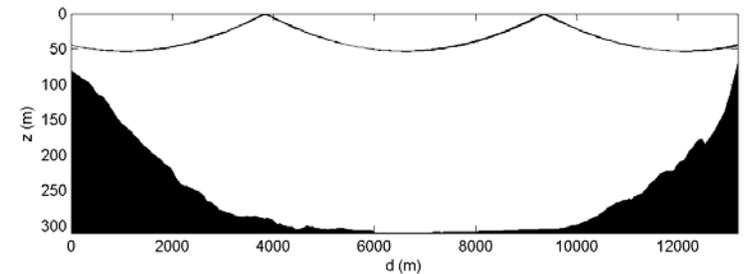
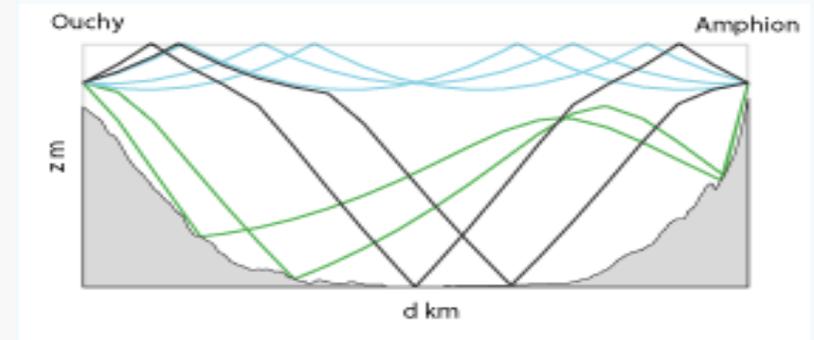
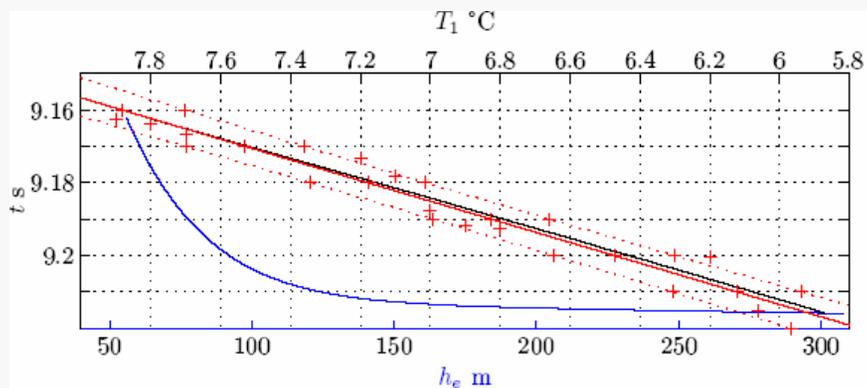
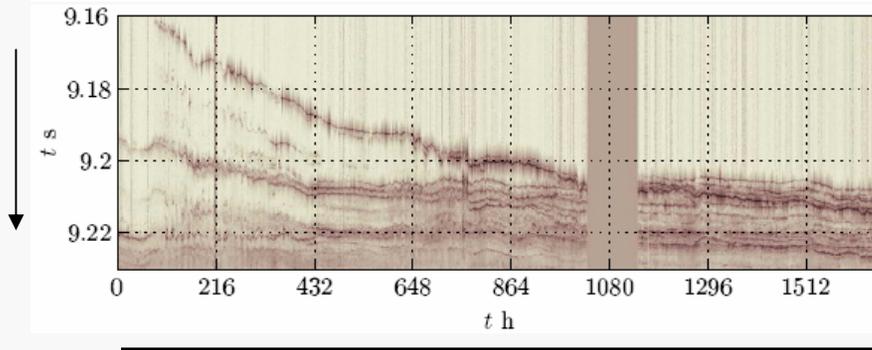
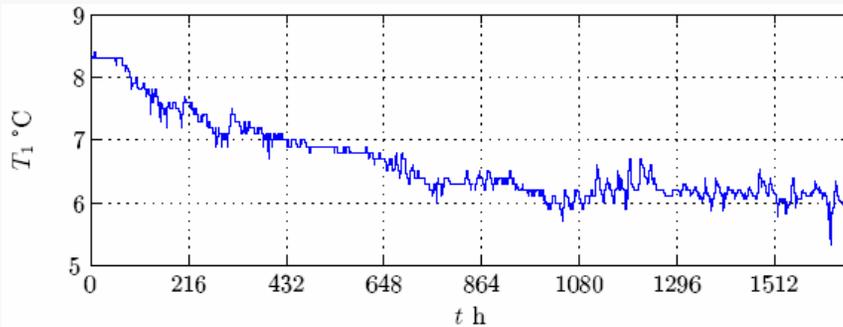
$$\Gamma_{re}(\tau) = (h * \Gamma_e)(\tau) + \Gamma_{be}(\tau)$$

Mesure du 18 déc. 2003 au 25 fév. 2004



Confrontation du modèle et de l'expérience

Température par 1 mètre de profondeur au mât de Buchillon (LHE)

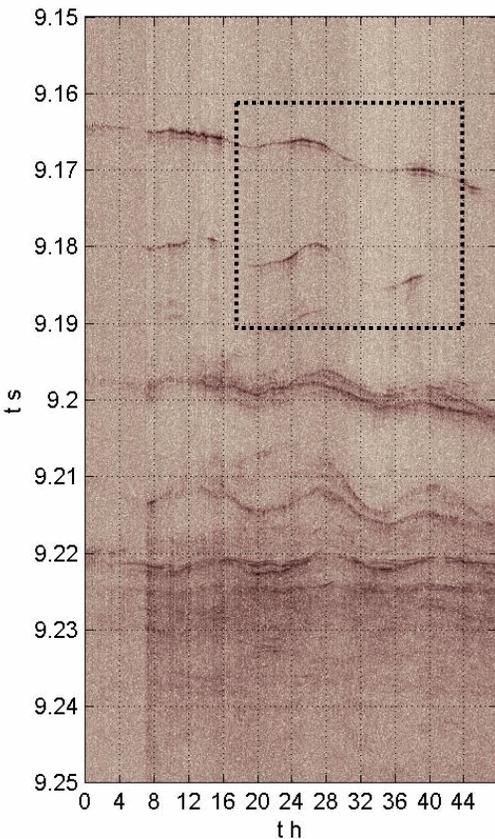
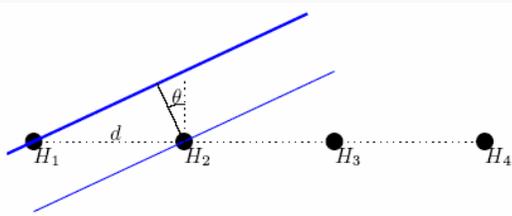


Validation sur groupe de rayons R-SR

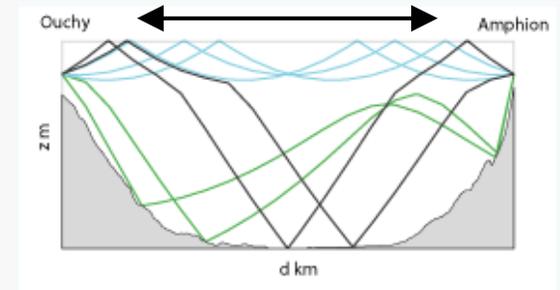
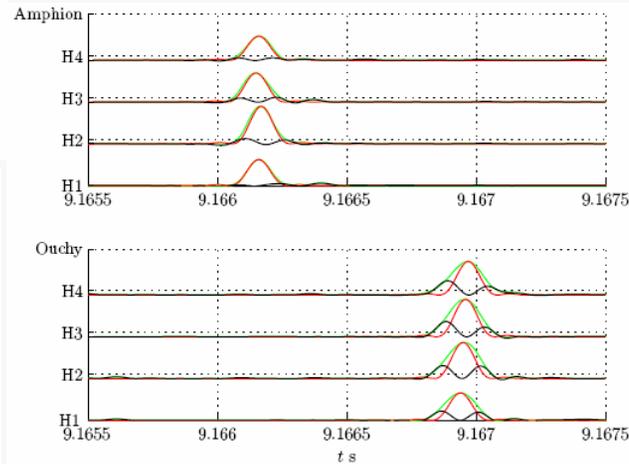


Identification des rayons R-SR et SR-BR

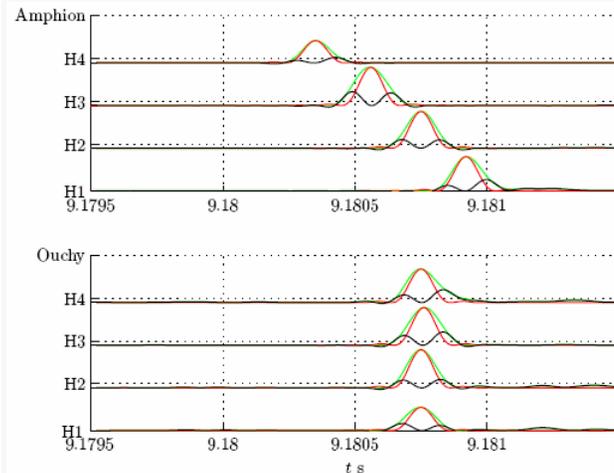
Identification et découplage de T et u



Groupe de rayons R-SR



Groupe de rayons SR-BR



température

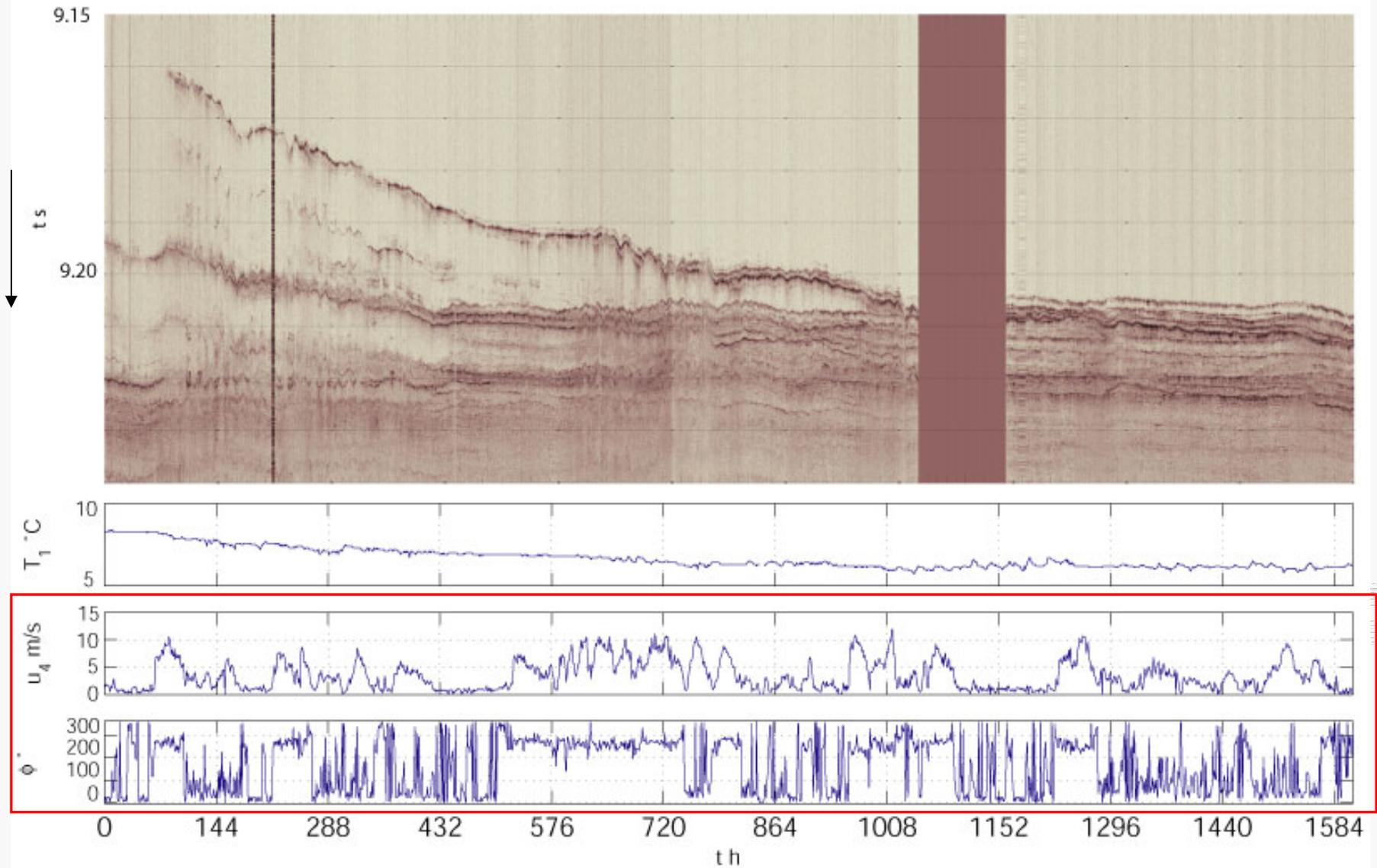
courant u

$$d_p = - \int_{\Gamma_p} ds \frac{u}{c^2}$$

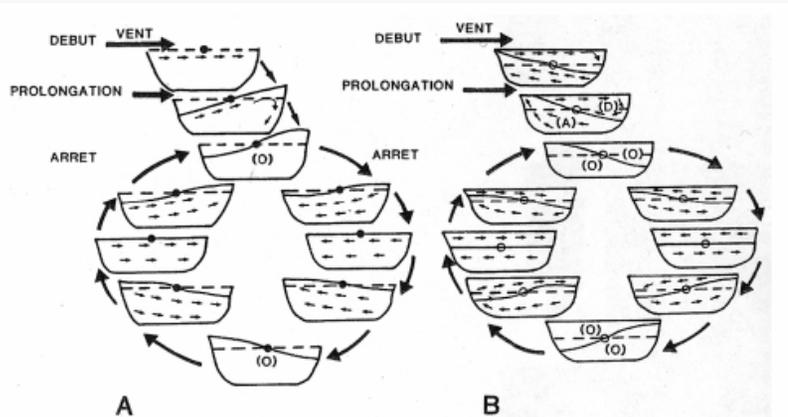
Trajets identifiés

Périodicités observées

Effets du vent



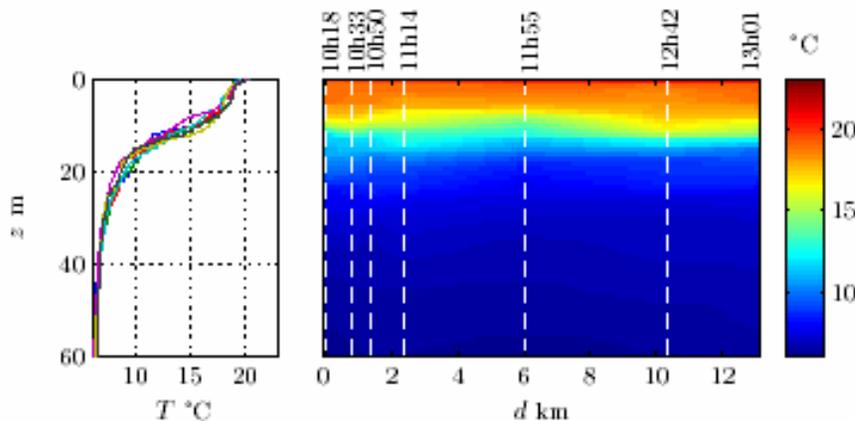
Ondes internes stationnaires et non stationnaires



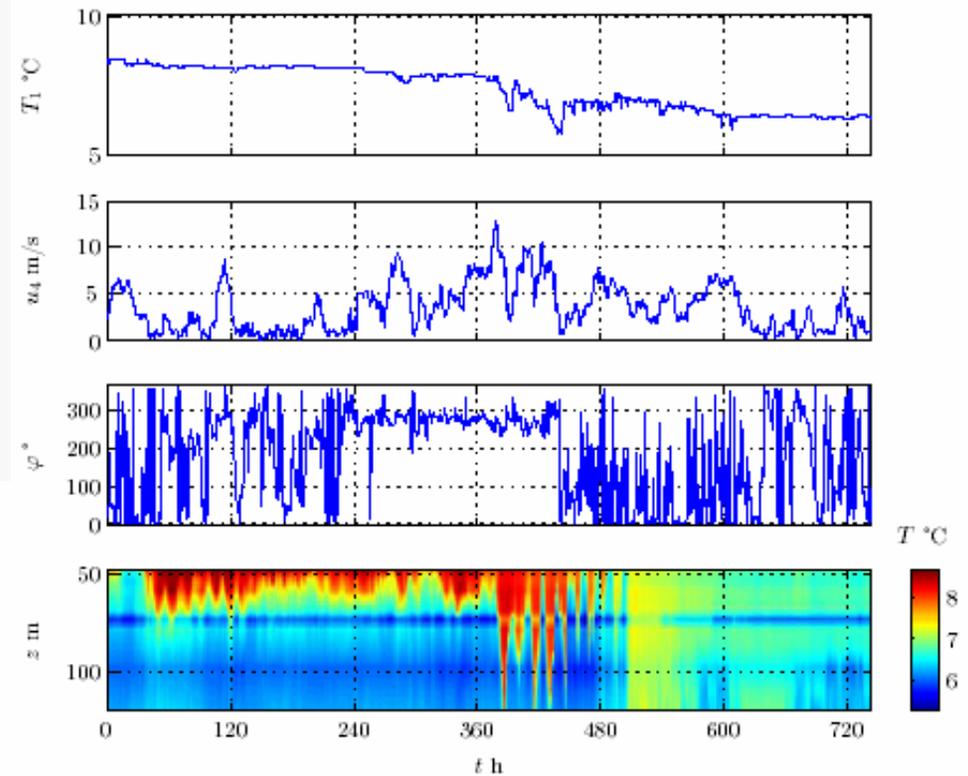
Genèse des ondes stationnaires dans un lac.

A. Seiches situées à l'interface air-eau dans un lac homogène ; B. Ondes internes se produisant à la thermocline (lac stratifié) ; (A) = courant convectif ascendant ; (D) = courant convectif descendant ; (O) = absence d'écoulement. Un cycle complet d'oscillation est représenté. La ligne horizontale en tirets représente la position d'équilibre des interfaces (air-eau et eau-eau) (d'après Mortimer, 1975).

Répartition spatiale de la température entre Ouchy et Amphion. Relevés depuis un bateau (LHE).



Météorologie et températures relevées sur le site d'Amphion avec une ligne de thermistances.

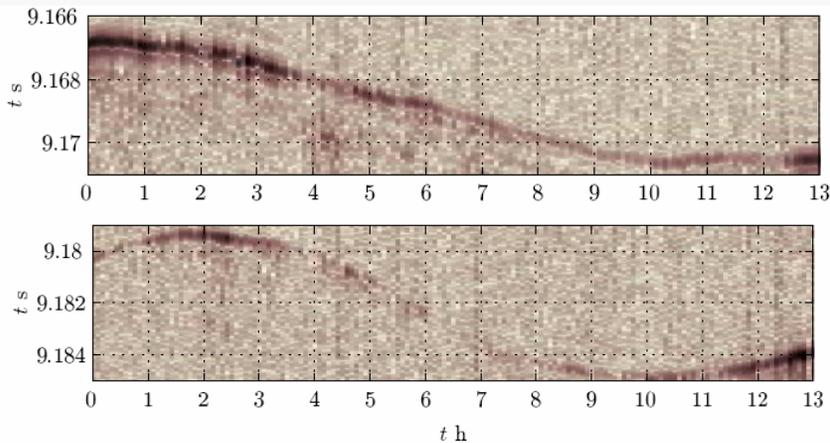


Ondes internes stationnaires et refroidissement

- Modèle simple à deux couches de la structure thermique perturbée par le champ de vent en surface.
- Pas d'interaction entre l'épilimnion et la thermocline.
- Surface du lac considérée plane.
- Pas de courants de retour à l'équilibre

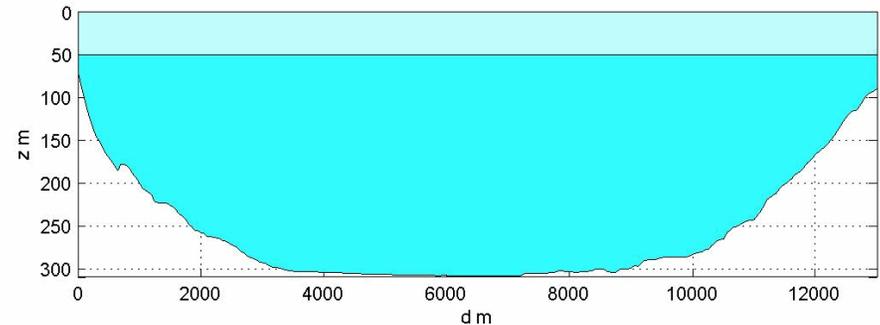
Expérience

Période de l'ordre de 13 heures.
Refroidissement et basculement observés



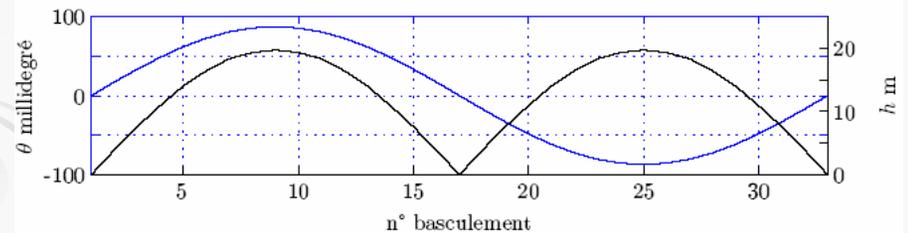
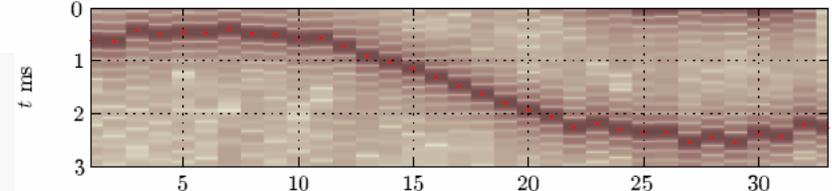
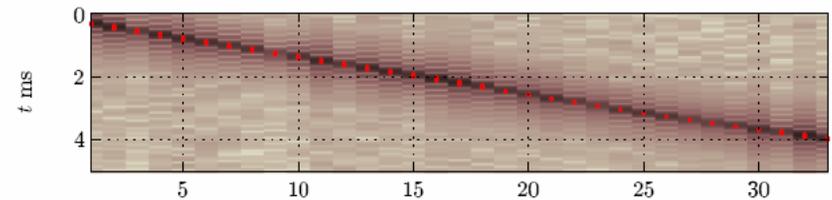
Ordre de grandeurs semblables

Variations identifiées



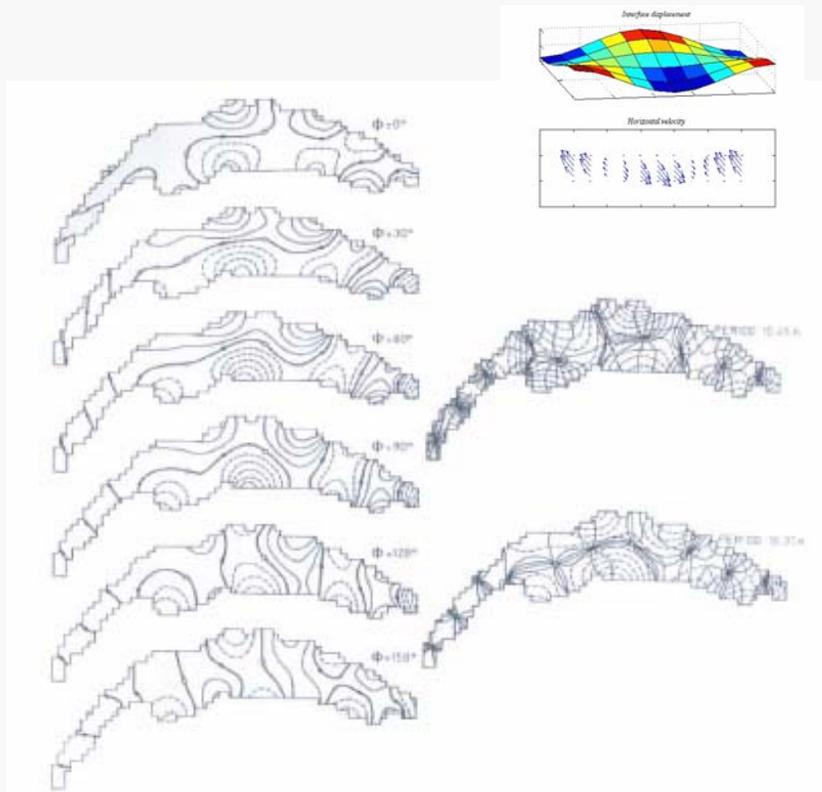
Modèle

Basculement 20 m
Refroidissement he : 60 → 63,2 m

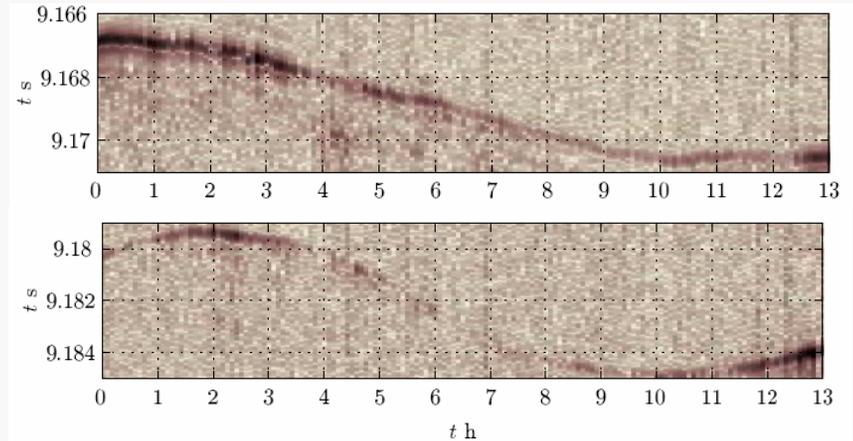


Ondes internes stationnaires et refroidissement

Modèle hydrodynamique



Expérience



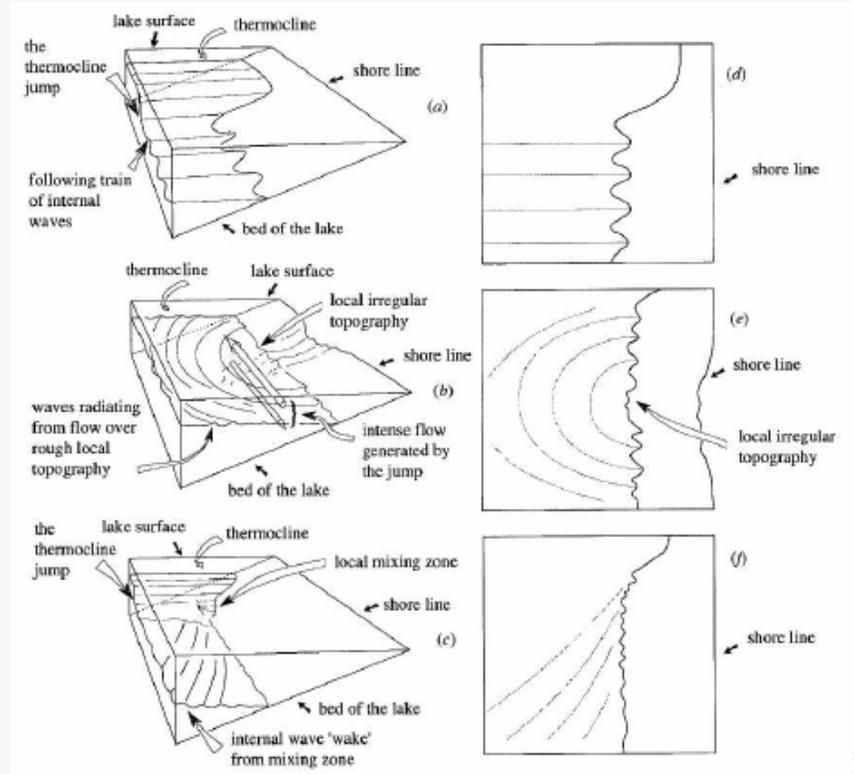
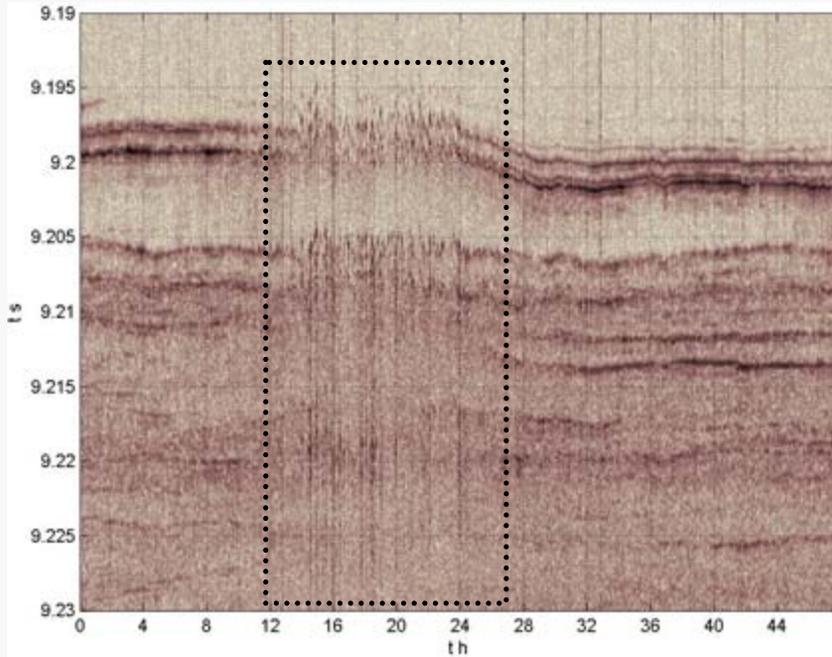
Amélioration:

Développer un modèle dynamique qualifiant les ondes internes stationnaires et leurs influences sur la propagation.



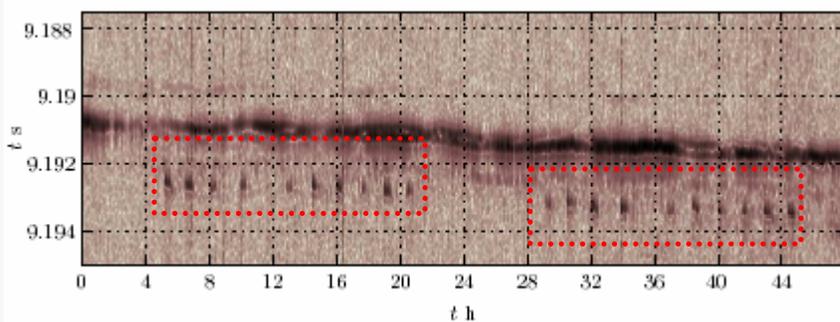
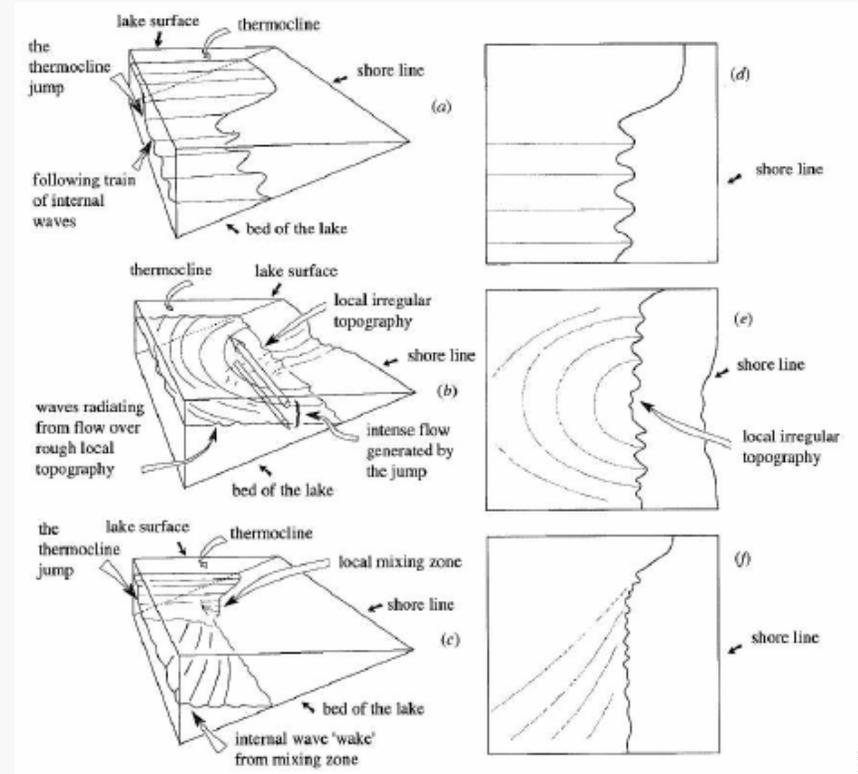
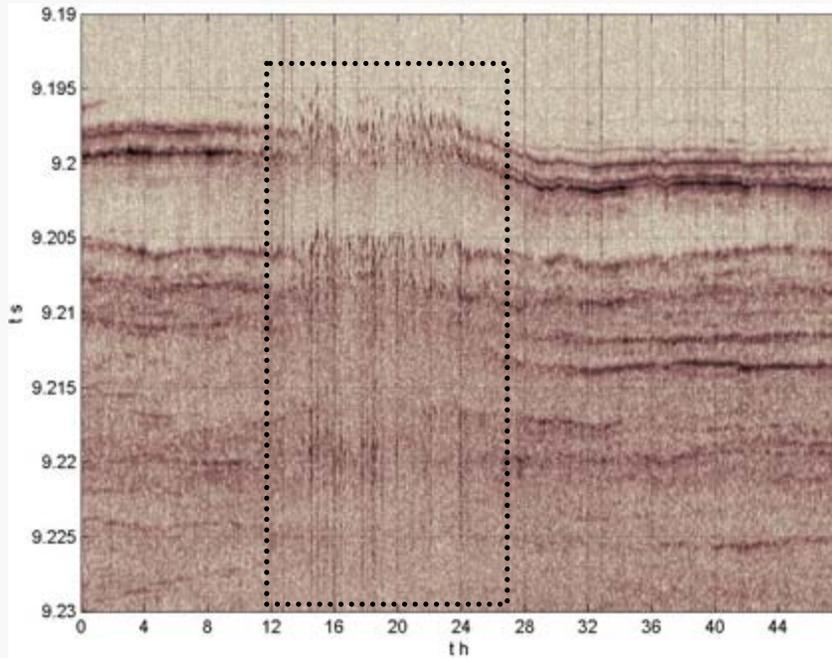
Ondes internes non stationnaires

Perturbation des temps sur les 2 sites suite à un événement de vent fort



Ondes internes non stationnaires

Perturbation des temps sur les 2 sites suite à un événement de vent fort



Apparitions intermittentes sur le site d'Ouchy, absentes sur le site d'Amphion.

Réfraction dans le plan horizontal ?

→ Modélisation 3D

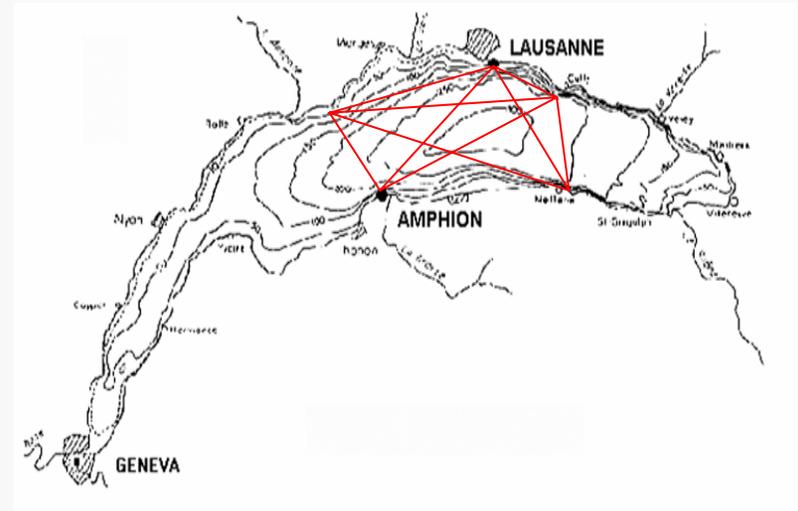
Perspectives pour la tomographie du Léman

➤ Traitement des expériences hivernales 2003/2004 et 2004/2005

- Synthèse du problème direct
- Mesure de stratification thermique
- Mesure des composantes de courant
- Amélioration des modèles dynamiques

➤ Réseau d'observation 3D

- Vorticité du Grand Lac
- Echange entre le Petit Lac et le Grand Lac



Limnologie physique - Océanographie physique

Acoustique - Traitement du signal - Problèmes inverses



Mesure du 20 déc. 2004 au 18 mars 2005

