

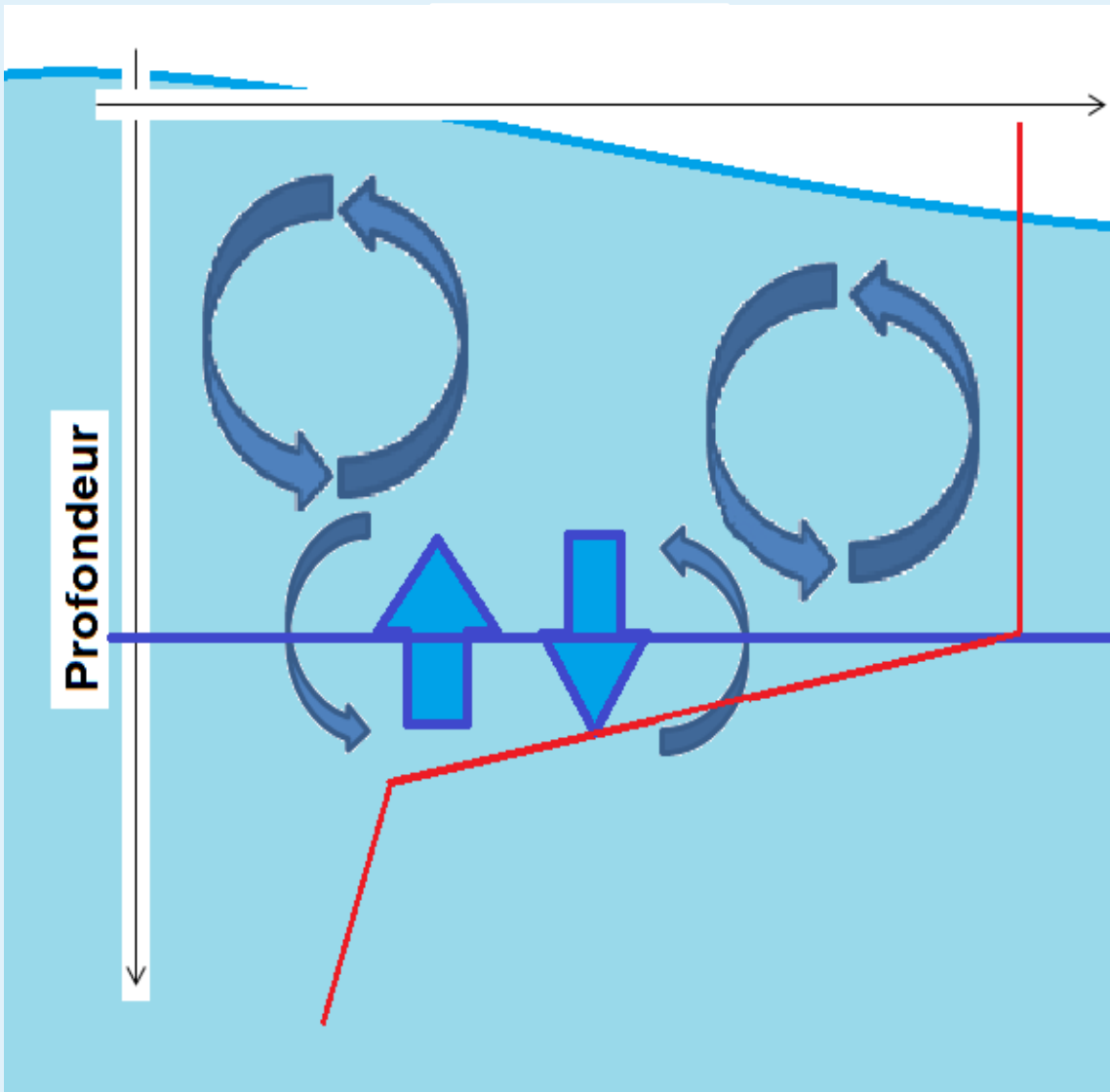
Mesures de turbulence dans la baie de Marseille : analyse et interprétation

Romain Rainaud

Stage de Master 2
Encadrement : Anne Petrenko et Andrea Doglioli

21 juin 2012

Qu'est-ce que la turbulence ?



- Processus aléatoire, chaotique, rotationnel
- Impact sur la biologie, la physique, la chimie
- Turbulence verticale participe au mélange

Théorie

1. Conservation du mouvement

$$\frac{d\bar{u}_i}{dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - 2\varepsilon_{ijk} f \bar{u}_k - \frac{\rho'}{\rho_0} g \delta_{i3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \nu_T \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right)$$

ν : viscosité cinématique moléculaire

ν_T : coefficient de viscosité
cinématique due à la turbulence

$$A_Z = \nu + \nu_T$$

avec $\nu \ll \nu_T$

2. Conservation de la chaleur

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\kappa_T \frac{\partial T}{\partial x_j} + K_{Turb} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \phi_T$$

κ_T : diffusivité thermique moléculaire

K_{Turb} : coefficient de diffusivité
thermique due à la turbulence

$$K_Z = \kappa_T + K_{Turb}$$

avec $\kappa_T \ll K_{Turb}$

3. Nombre de Prandtl turbulent

$$Pr_T = \frac{\nu_T}{K_{Turb}} \approx 1$$

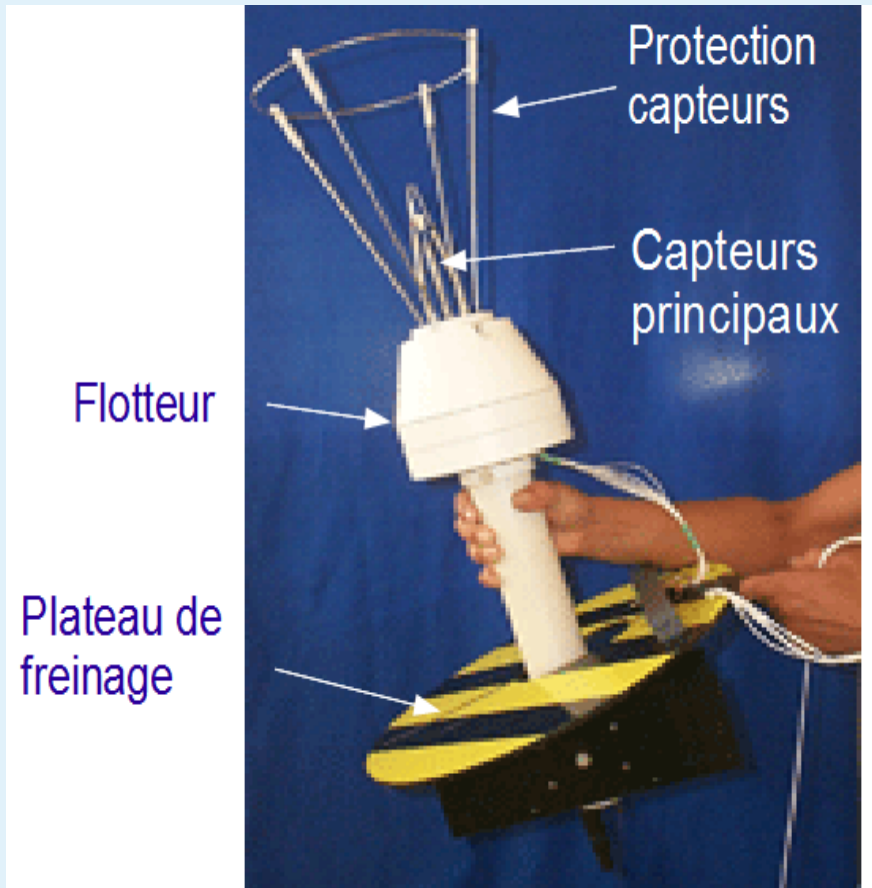
Mesures de température pour
estimer les paramètres turbulents

Objectifs du stage :

- Mesures *in situ* pour quantifier K_Z
- Étudier l'évolution temporelle de K_Z
- Comparaison avec des modèles numériques

Le SCAMP

Self Autonomous Micro Profiler



- Mesures à fine échelle de température et conductivité
- Fréquence : 100 Hz
- Vitesse de mesure : 10 – 20 $cm s^{-1}$
- Profondeur maximale : 100 m
- Analyse des données : Matlab

Calcul de K_Z

Méthode de *Osborn* (1980)

$$K_Z = \Gamma N^{-2} \epsilon + \kappa_T$$

Γ : Efficacité de mélange

$$\Gamma = 0,2$$

Osborn (1980)

Oakey (1982)

Roget (com. pers.)

N : Fréquence de
Brünt-Väisälä

ϵ : Taux de dissipation
visqueuse



Méthode de Batchelor

Méthode de Batchelor

Luketina and Imberger (2001)

$$\epsilon_B = \frac{\nu \kappa_T^2}{L_B^4}$$

L_B : Échelle de longueur de Batchelor

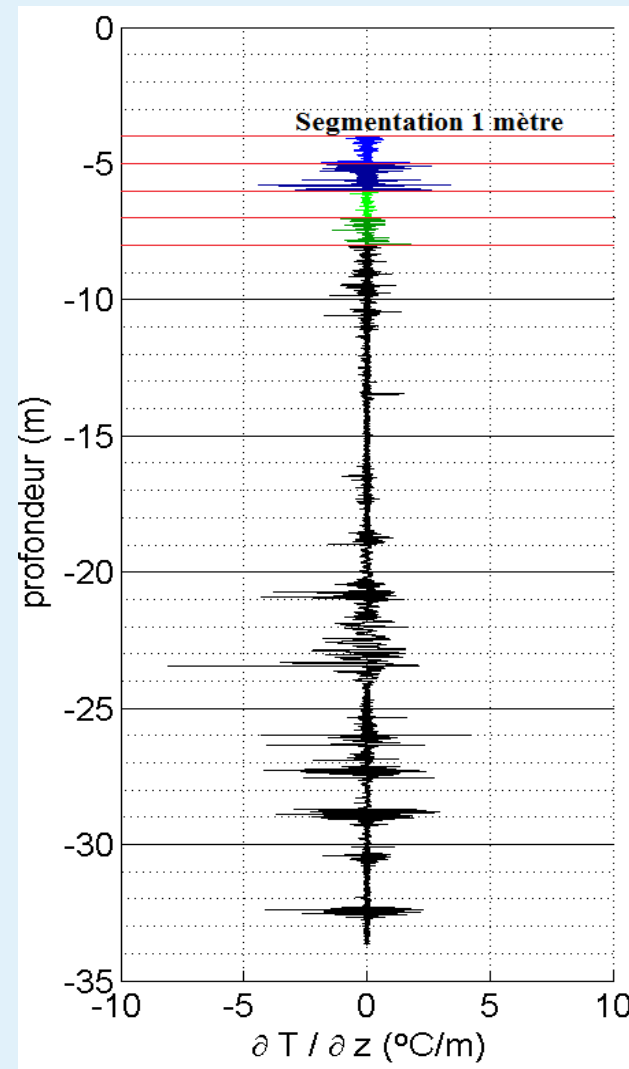


Traitement des données

- Profil de gradient vertical de température
- Segmentation tous les mètres

➔ **Profils verticaux de ϵ_B et K_Z**

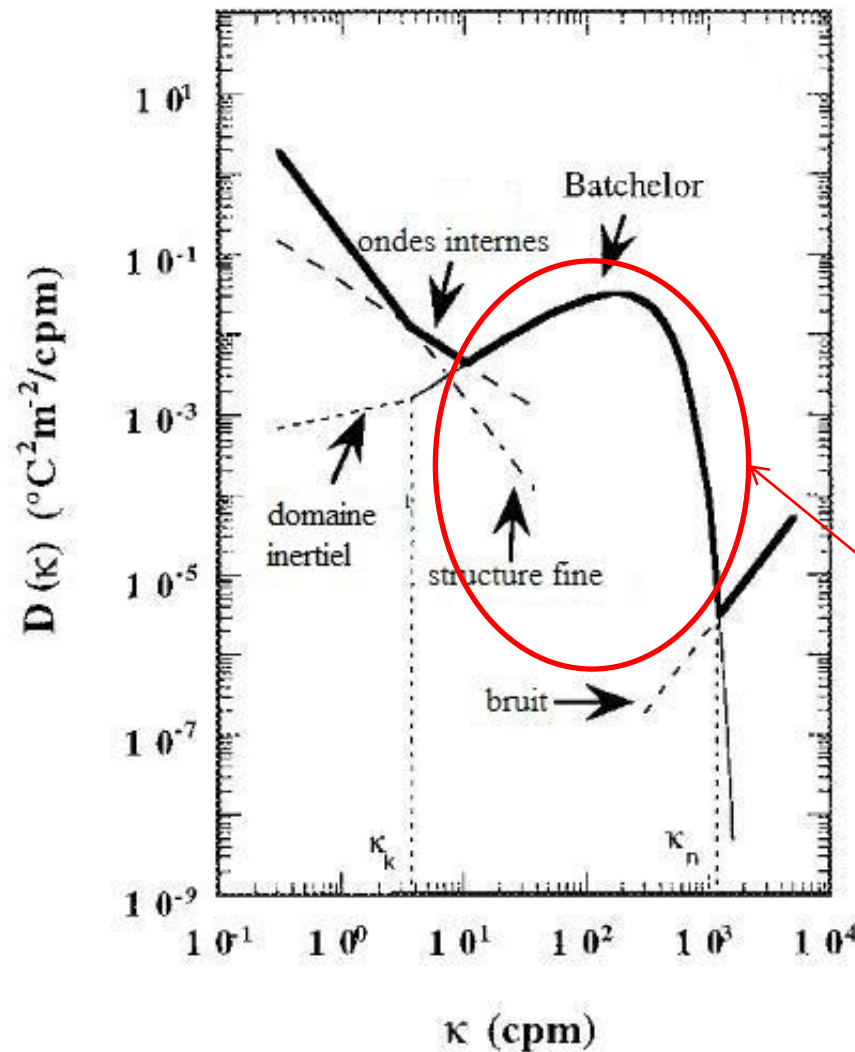
Profil vertical de gradient vertical de température segmenté tous les mètres



Transformée
de Fourier

Traitement des données

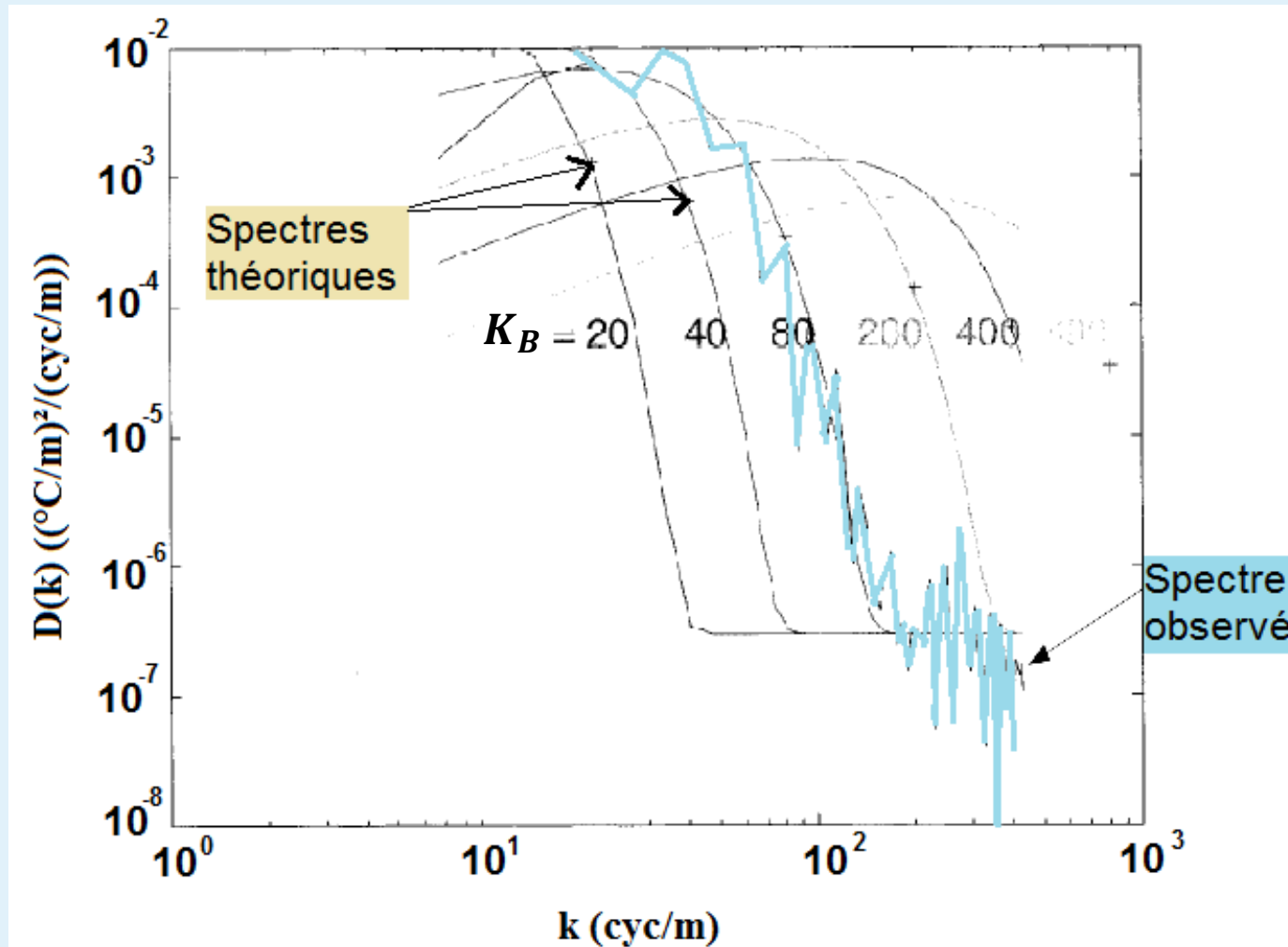
Transformée
de Fourier



Densité spectrale
des processus
turbulents

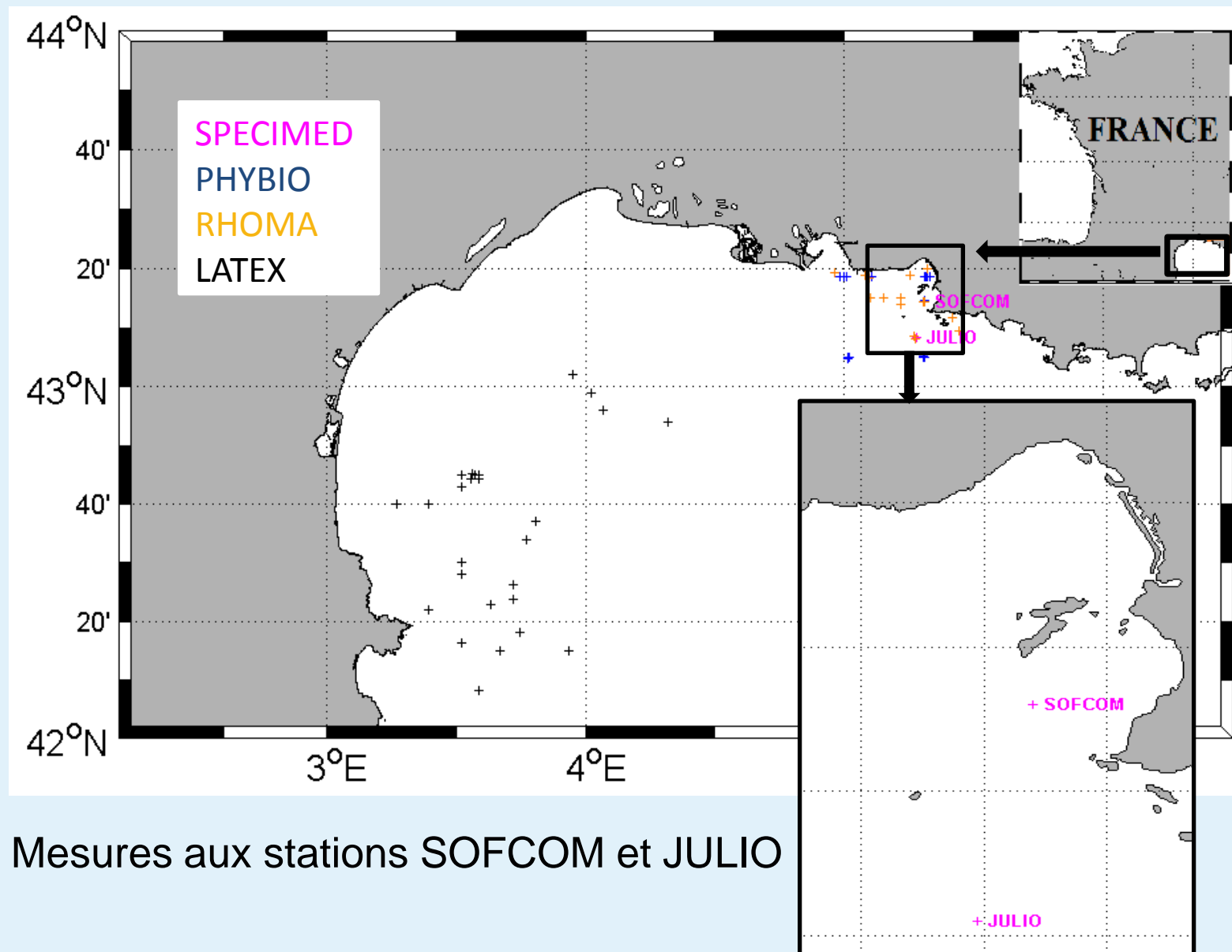
*Signature spectrale de différents processus physiques
Luketina and Imberger (2001)*

Traitement des données



Obtention du nombre d'onde de Batchelor K_B

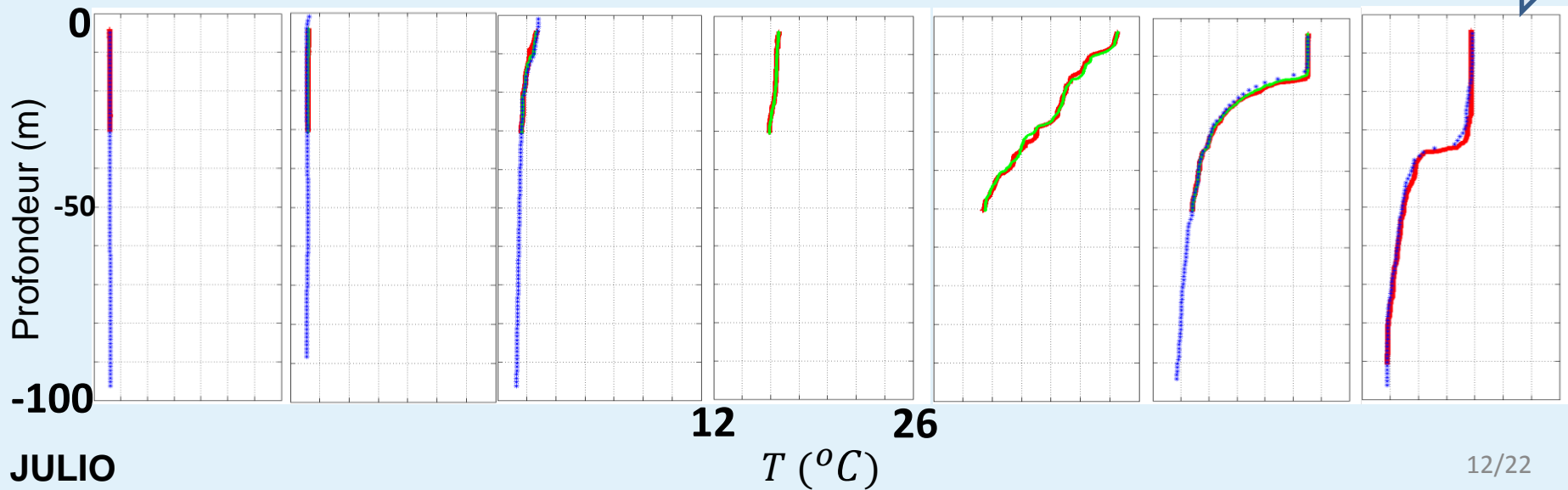
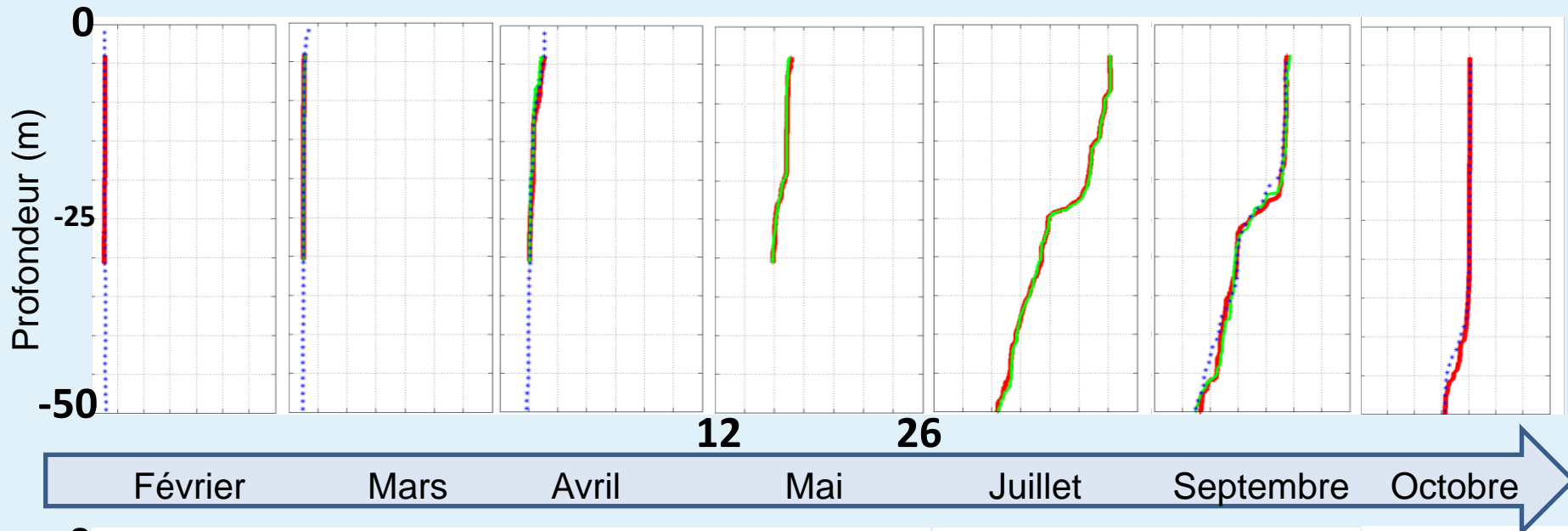
Base de données



Température

SCAMP
SCAMP
CTD

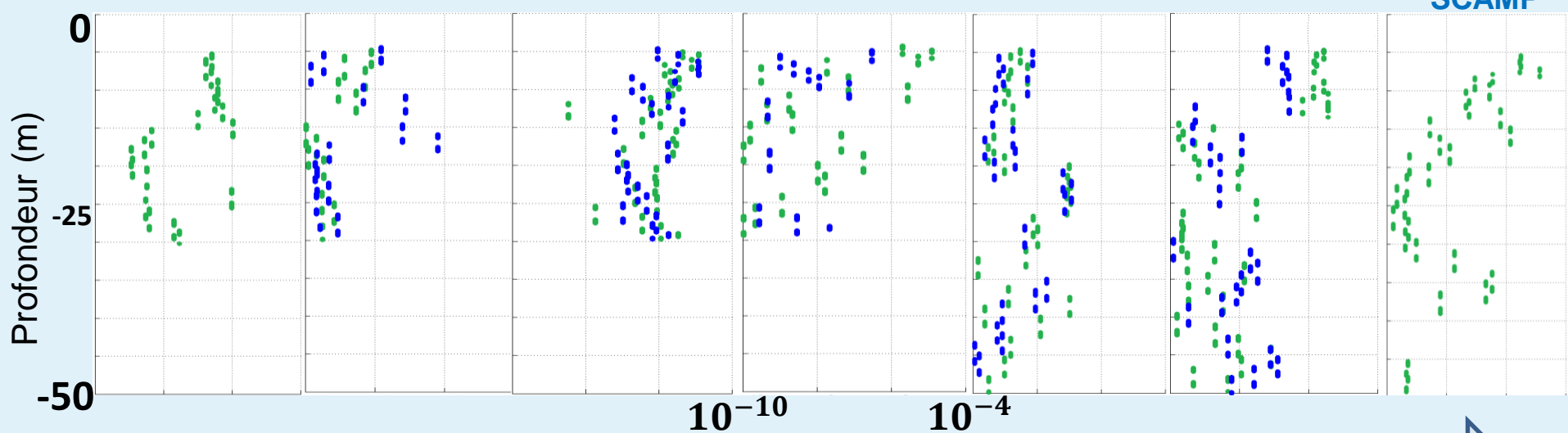
SOFCOM



Taux de dissipation visqueuse ϵ_B

SCAMP
SCAMP

SOFCOM



Février

Mars

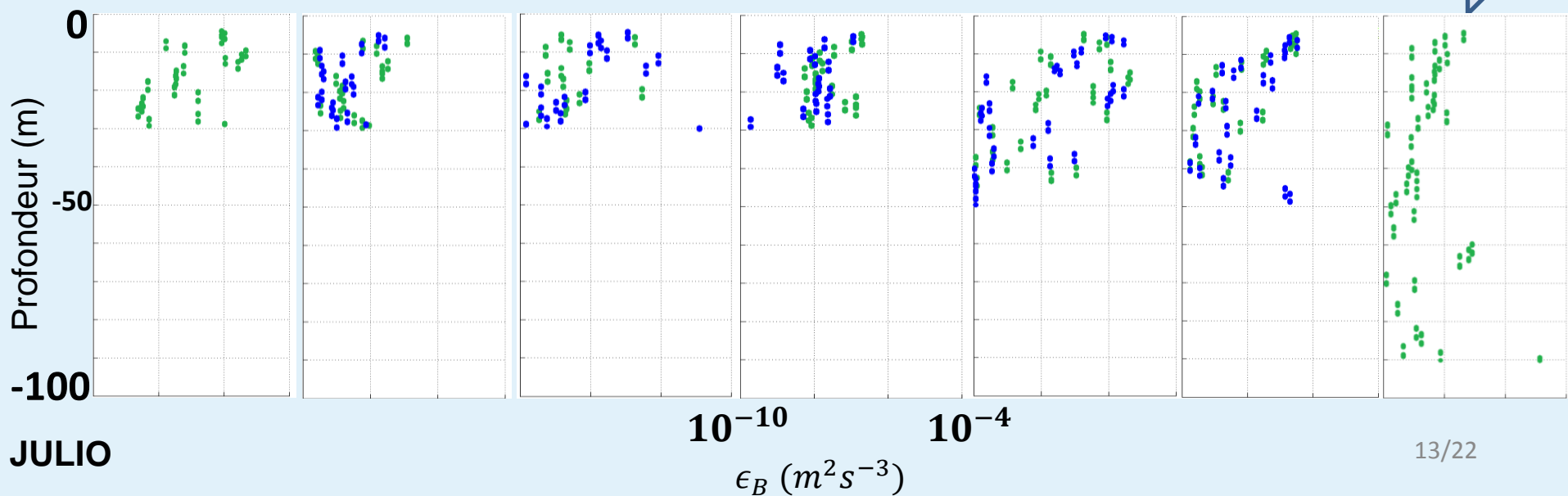
Avril

Mai

Juillet

Septembre

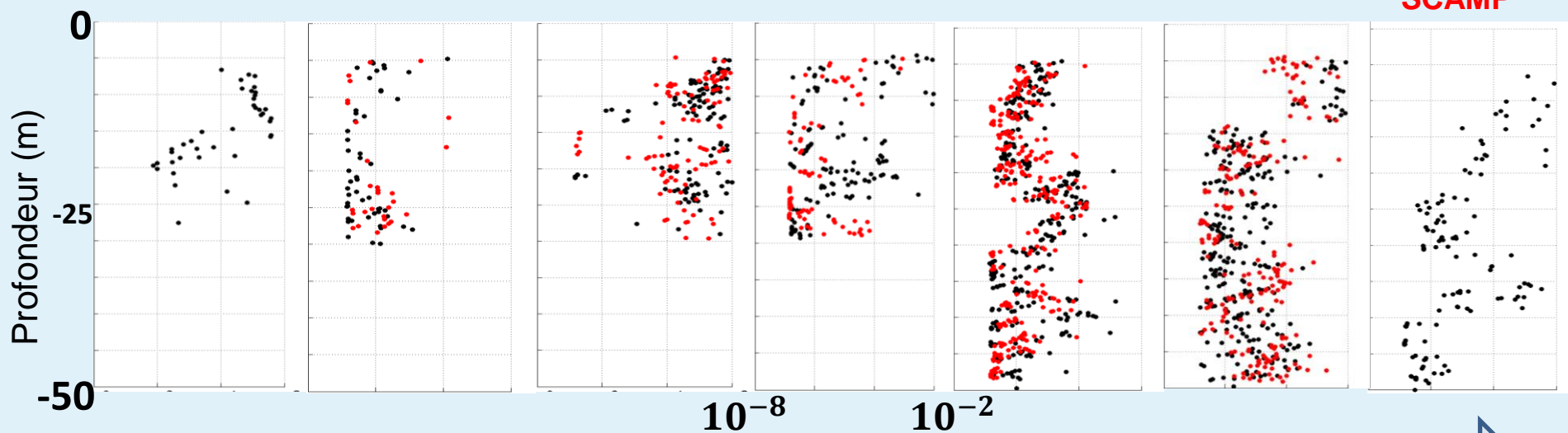
Octobre



Coefficient de diffusivité K_Z

SCAMP
SCAMP

SOFCOM



Février

Mars

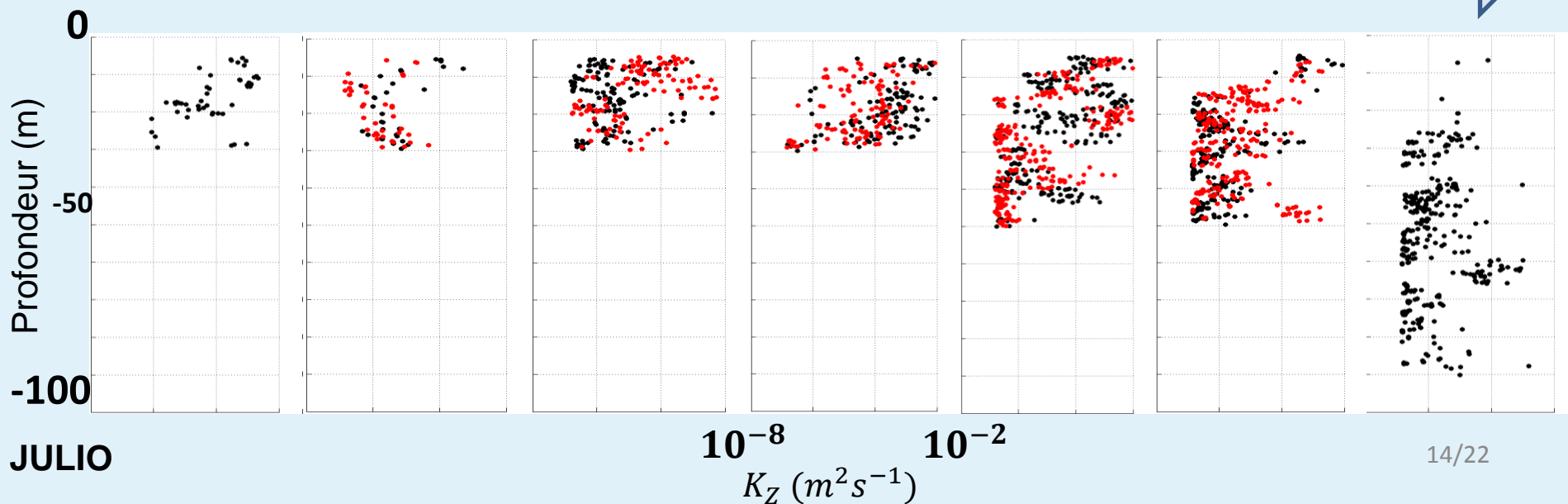
Avril

Mai

Juillet

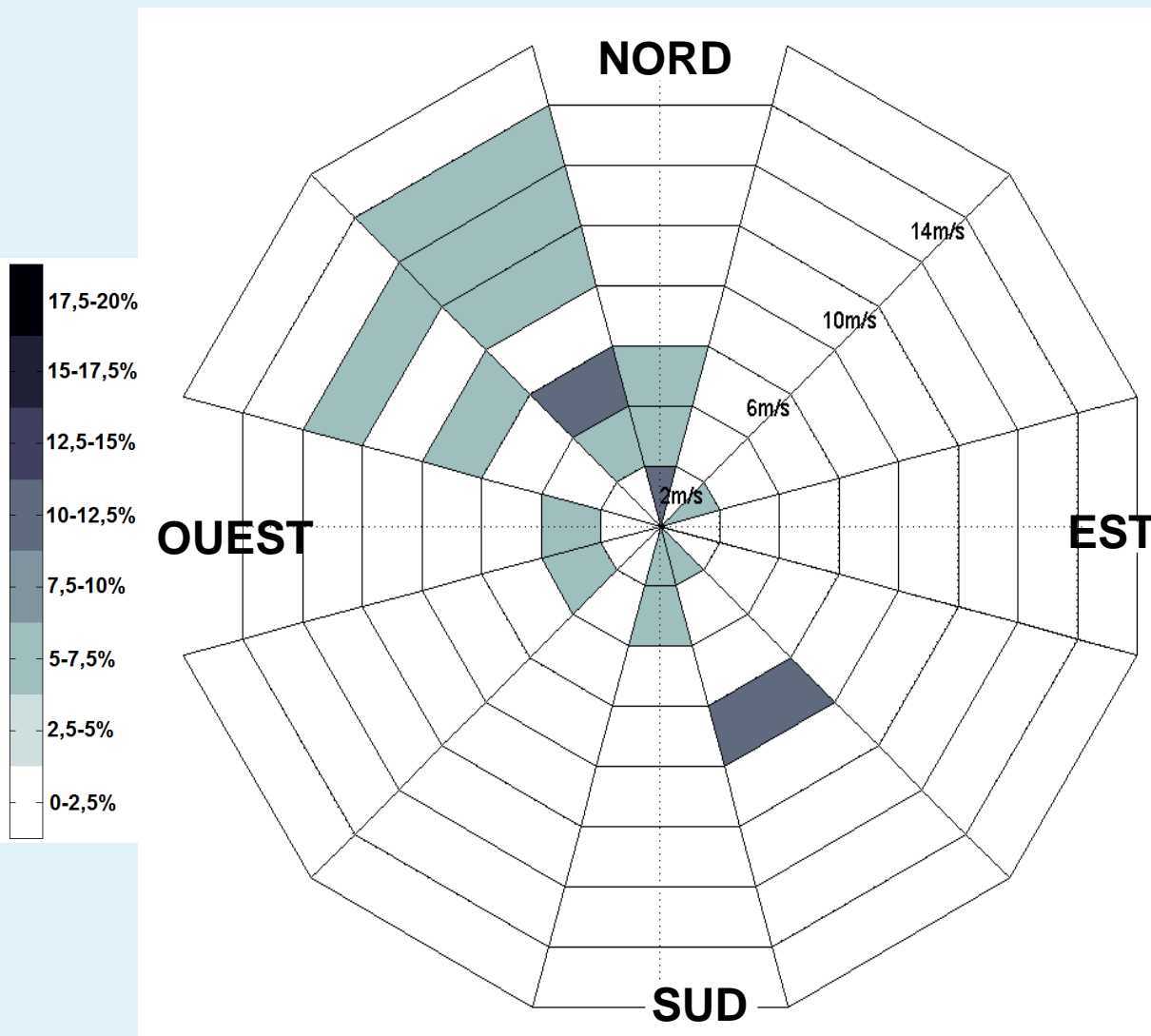
Septembre

Octobre



JULIO

Rose des vents

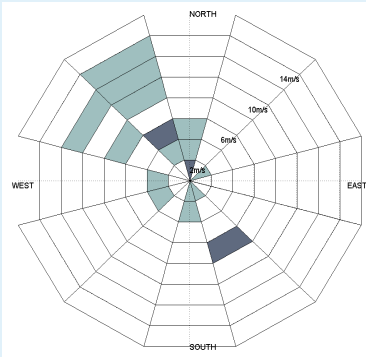


Rose des vents du 13/09 (SOFCOM)

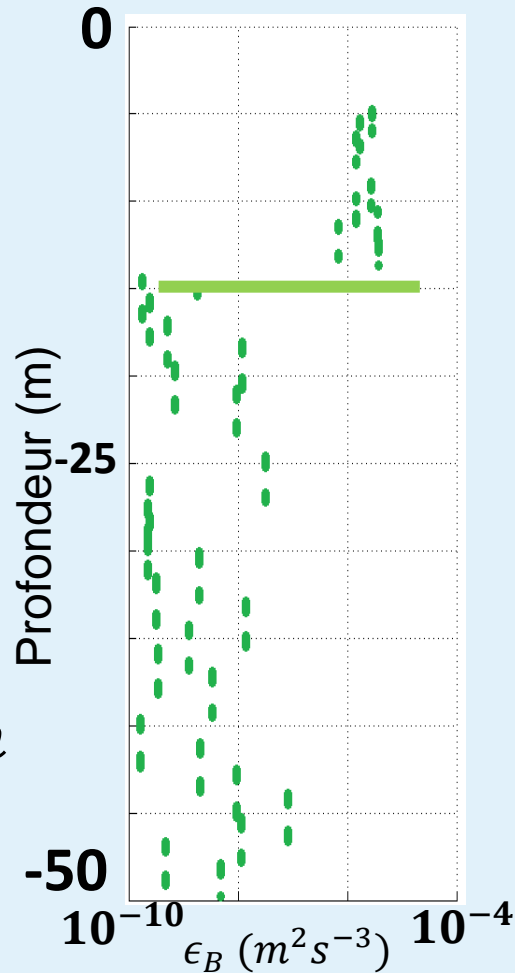
- Données fournies par Météo France (modèle ALADIN)
- Résolution spatiale : 10 km
- Résolution temporelle : 3 h
- Rose des vents ayant soufflé pendant 3 jours avant la mesure

Influence du vent sur ϵ_B

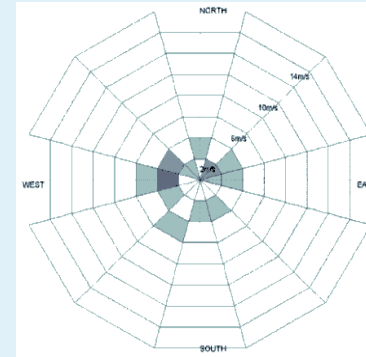
Vent fort



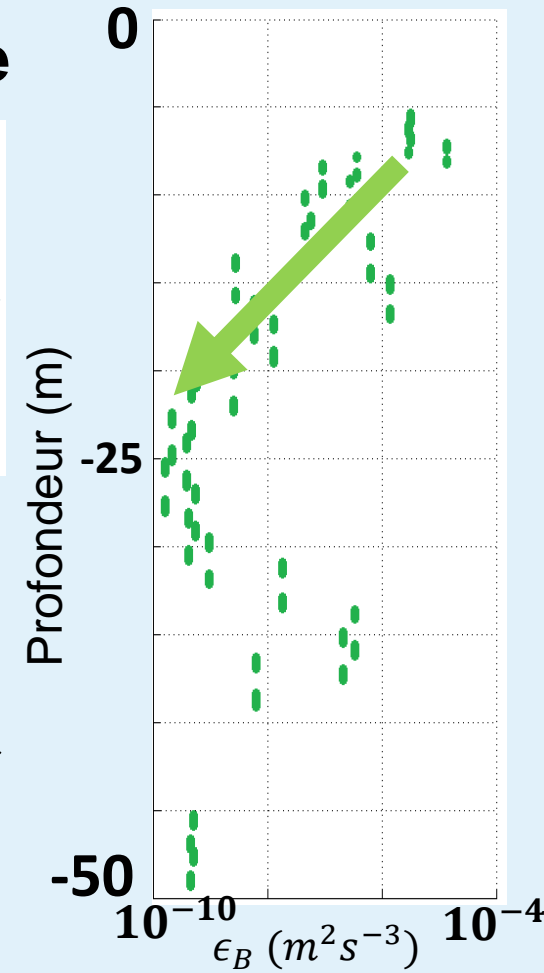
$$D_E = 17 \text{ m}$$



Vent faible



$$D_E = 9 \text{ m}$$



Vent moteur des processus turbulents

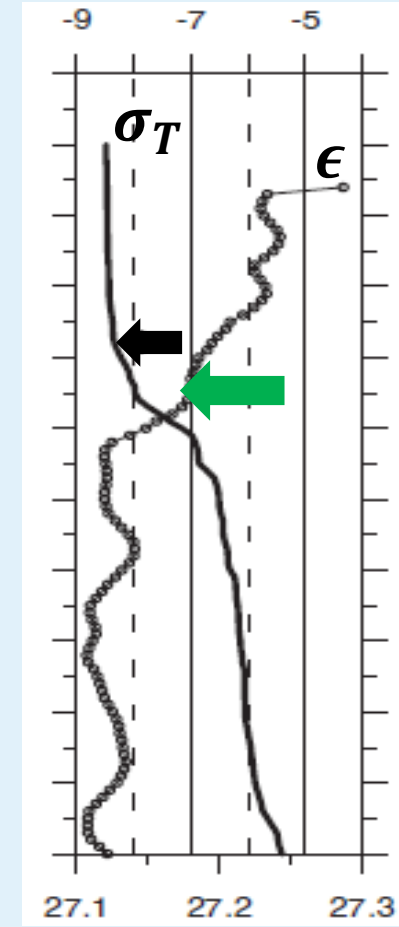
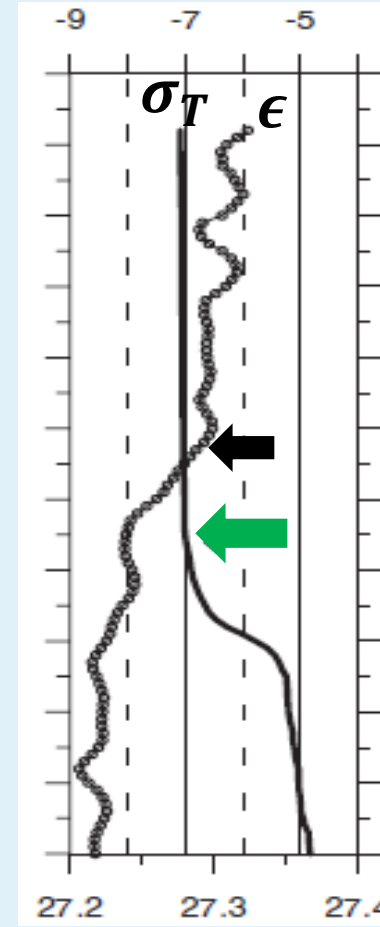
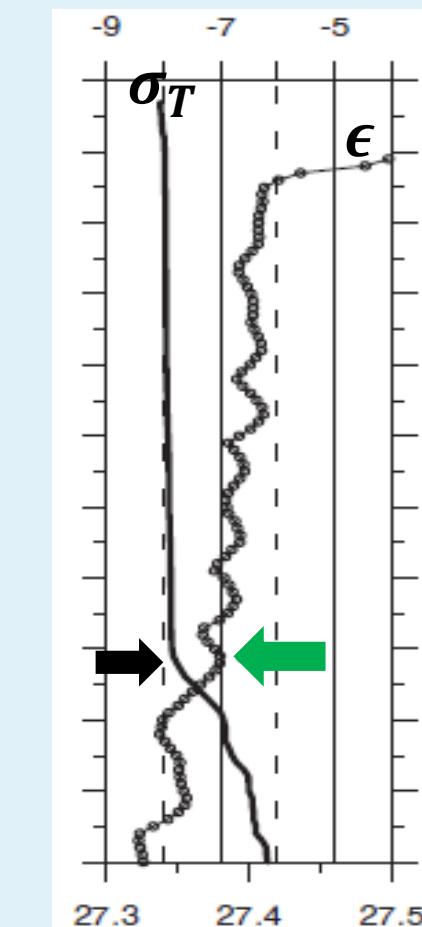
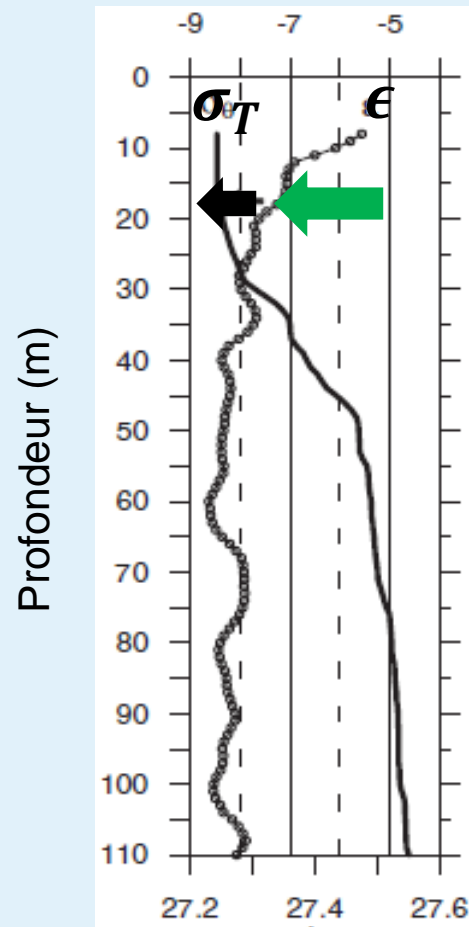
Couche de mélange vs mélangée

h_ϵ : Profondeur de la couche de mélange

h_D : Profondeur de la couche mélangée

$\log(\epsilon) \text{ (m}^2\text{s}^{-3}\text{)}$

Lozovatsky et al. (2006)



a) Vent faible

$h_\epsilon \approx h_D \text{ (20 m)}$

b) Vent fort

$h_\epsilon \approx h_D \text{ (80 m)}$

c) Après vent fort

$h_\epsilon \text{ (50 m)} < h_D \text{ (70 m)}$

d) Début vent fort

$h_\epsilon \text{ (45 m)} > h_D \text{ (35 m)}$

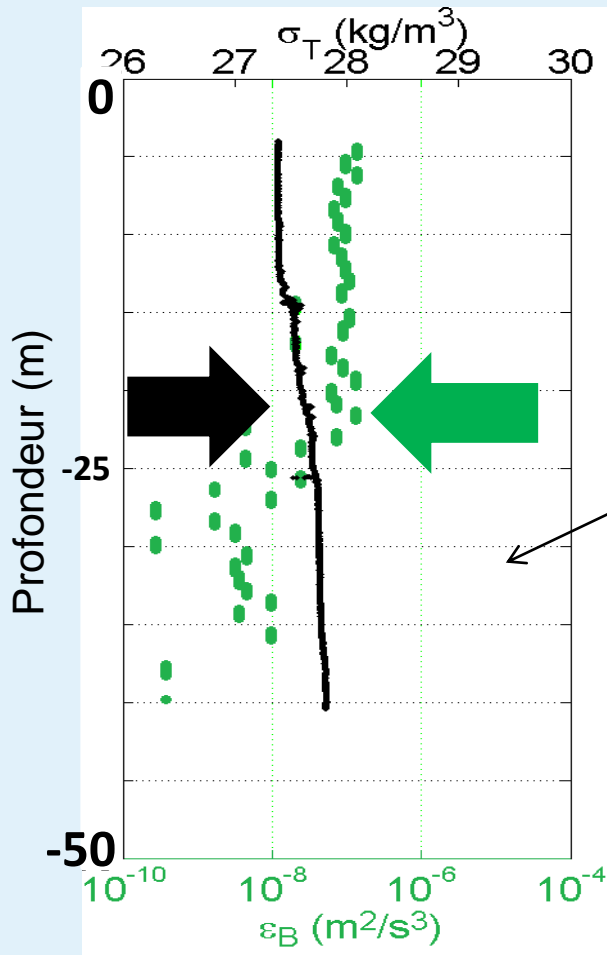
$\sigma_T \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$

Couche de mélange vs mélangée

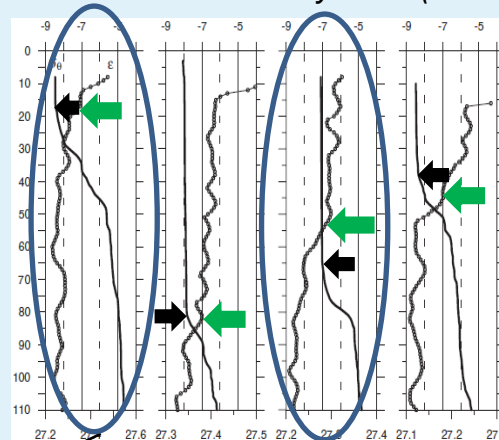
h_ϵ : Profondeur de la couche de mélange

h_D : Profondeur de la couche mélangée

Vent faible



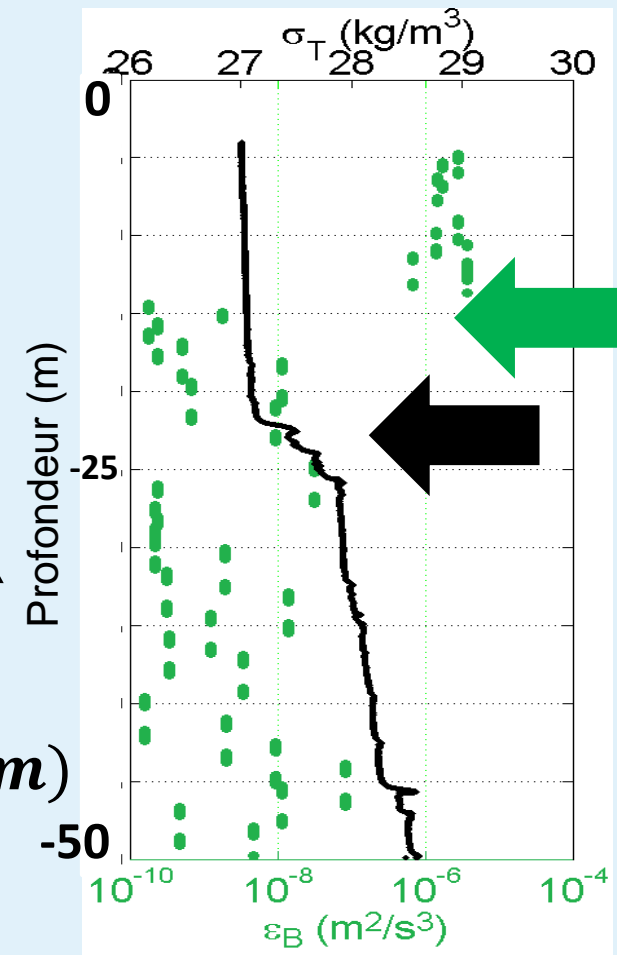
Lozovatsky et al. (2006)



$$h_D \approx h_\epsilon (22 \text{ m})$$

$$h_D(22 \text{ m}) > h_\epsilon(15 \text{ m})$$

Après vent fort



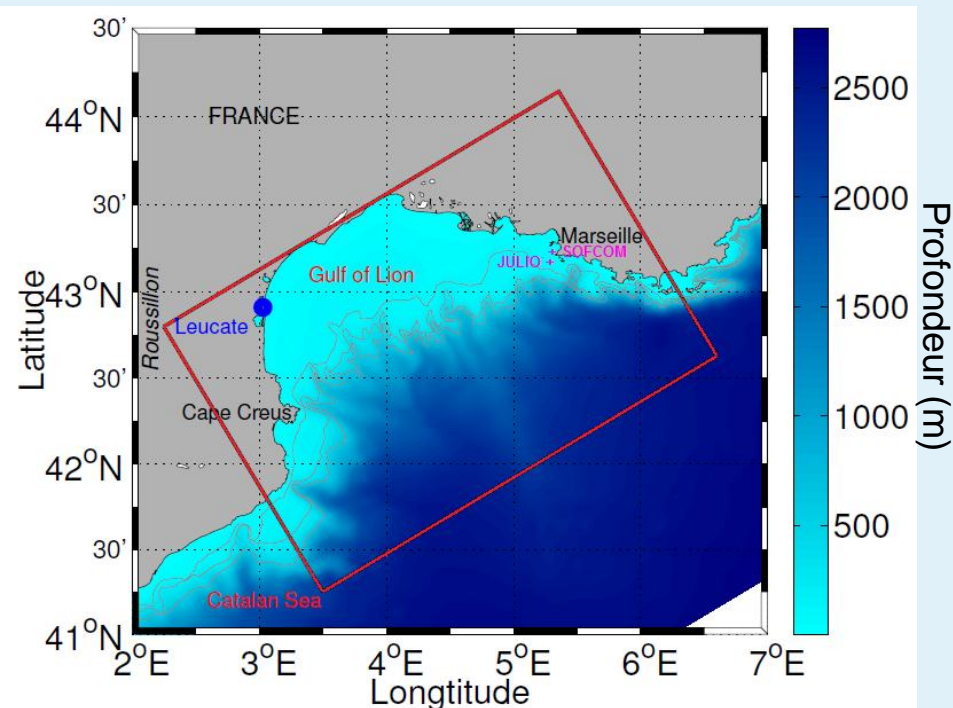
Comparaisons mesures/modèles

SYMPHONIE

Résolution : $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$

Forçage : ALADIN ($10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$)

Fermeture de la turbulence : *Gaspar et al. (1990)*

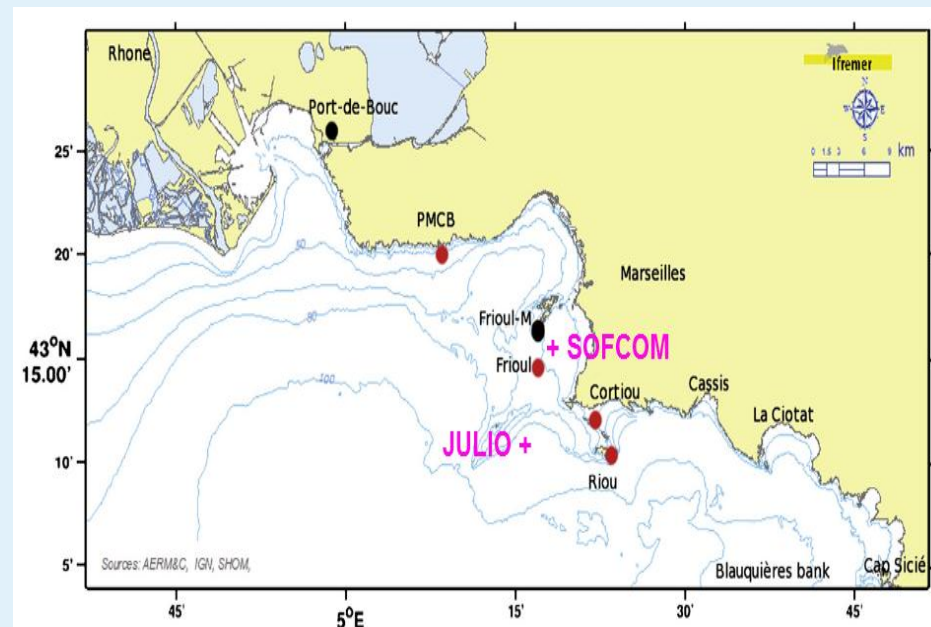


Kersalé et al. (2011)

MARS3D

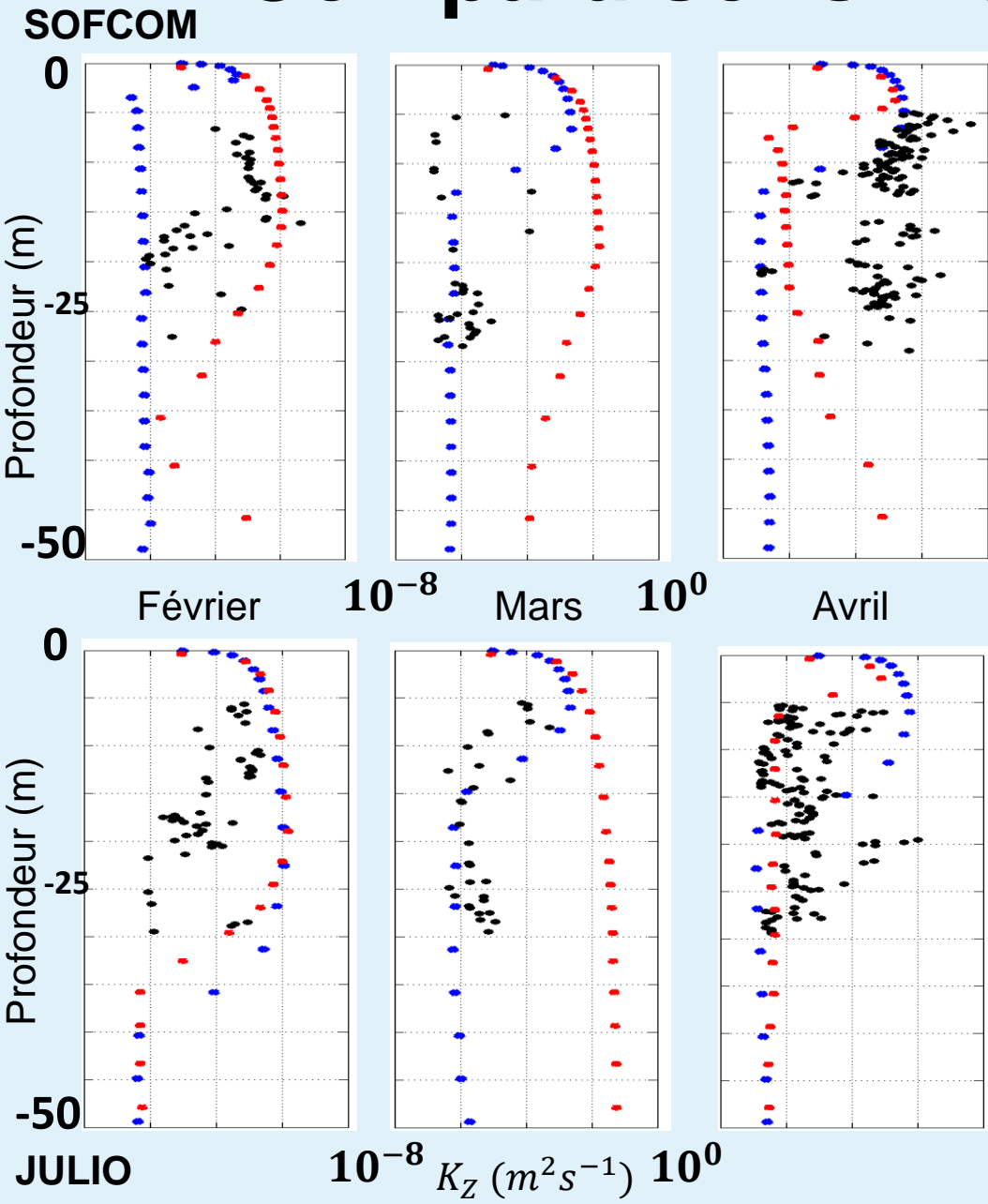
Résolution : $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$

Forçage : MM5 ($3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$)



Pairaud et al. (2011)

Comparaisons mesures/modèles



- Meilleure concordance à JULIO

- $K_Z^{MARS3D} \approx K_Z^{SCAMP}$

- $K_Z^{MARS3D/SCAMP} < K_Z^{SYMPHONIE}$

Mesures SCAMP

SYMPHONIE

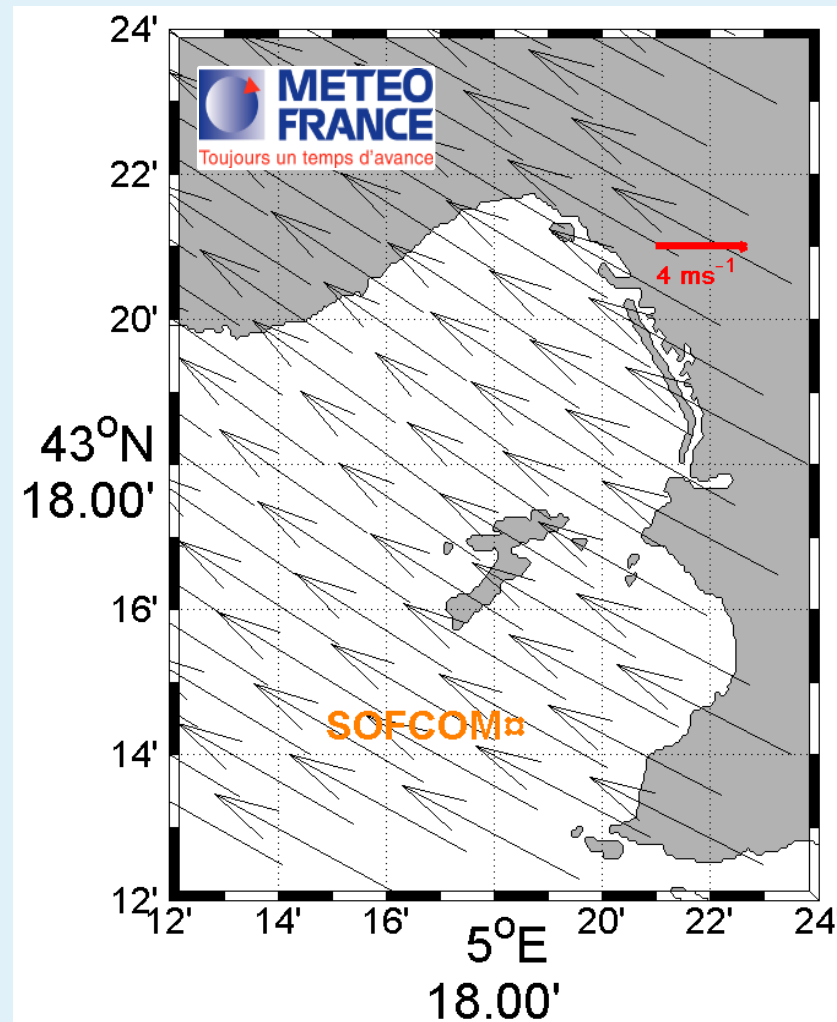
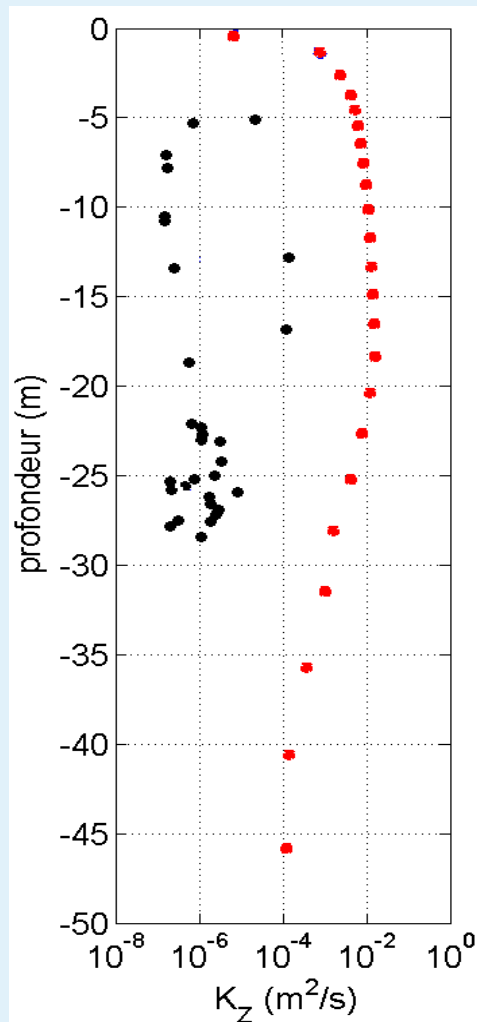
MARS3D

Comparaisons mesures/modèles

SOFCOM

Vent fort
(mars)

Mesures SCAMP
SYMPHONIE



Pas de protection orographique dans le modèle ALADIN

Conclusion et perspectives

- Pas d'évolution saisonnière des paramètres turbulents en 2011
- Surface : $10^{-7} < \epsilon_B < 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ et $10^{-6} < K_Z < 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
- En profondeur : $10^{-10} < \epsilon_B < 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ et $10^{-7} < K_Z < 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
- Vent moteur des paramètres turbulents
- Faire 2 mesures s'avère peu utile pour une étude statistique
- Pas de protection orographique => surestimation du vent et de K_Z (SYMPHONIE)
 - Comparer les sorties de ϵ des modèles avec les mesures
 - Utilisation des données SCAMP dans les modèles : K_Z ou ϵ mesurés

Merci de votre attention !

Extra slides

Conservation du mouvement

$$\frac{d\bar{u}_i}{dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - 2\varepsilon_{ijk} f\bar{u}_k - \frac{\rho'}{\rho_0} g\delta_{i3} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j}$$

- Approximation hydrostatique
- Fluide incompressible et newtonien
- Approximation de Boussinesq
- Méthode de Reynolds
- Suggestion de Boussinesq :

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_T \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

ν : viscosité cinématique
moléculaire

ν_T : coefficient de viscosité
cinématique due à la turbulence

$$A = \nu + \nu_T \quad \text{avec } \nu \ll \nu_T$$

A_H : composantes horizontales
Négligées

A_Z : composante verticale

Conservation de la chaleur

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\kappa_T \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{T' u'_j} \right) + \phi_T \quad \phi_T : \text{Sources ou puits}$$

Suggestion de Boussinesq :

$$-\overline{T' u'_j} = K_{Turb} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

κ_T : diffusivité thermique
moléculaire

K_{Turb} : coefficient de diffusivité
thermique due à la turbulence

$$K = K_{Turb} + \kappa_T$$

avec $\kappa_T \ll K_{Turb}$

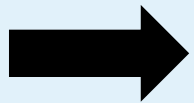
K_H : composantes horizontales
Négligées

K_Z : composante verticale

Nombre de Prandtl turbulent

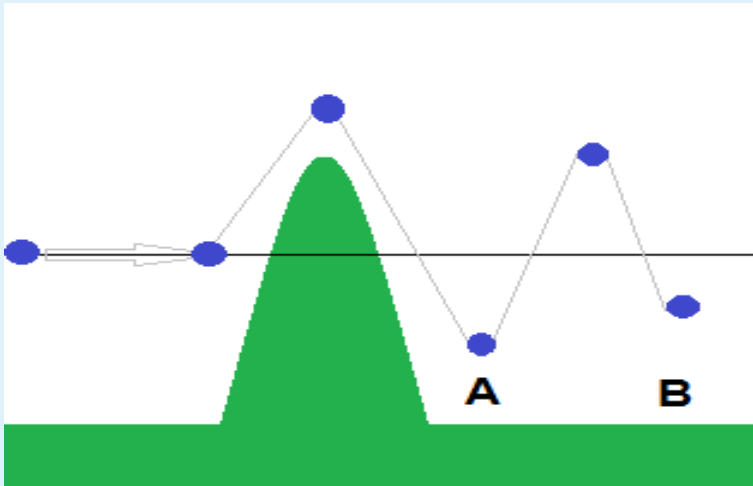
$$Pr_T = \frac{\nu_T}{K_{Turb}}$$

Hypothèse : $Pr_T = 1$



Utilisation des mesures de température pour l'estimation des paramètres turbulents

Fréquence de Brünt-Väisälä



*Oscillations générées par effet orographique,
en aval d'une montagne de pulsation N*

Période d'oscillation entre A et B : $T = \frac{2\pi}{N}$



Pulsation d'oscillation d'une particule de fluide de masse volumique ρ autour de sa position d'équilibre :

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

ρ calculé grâce aux mesures SCAMP à partir de la température et la salinité

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha_T(T - T_0) + \beta_S(S - S_0)) - 1000$$

Le SCAMP (Self Contained Autonomous Micro Profiler)

Types de profils

Descendants / Downward

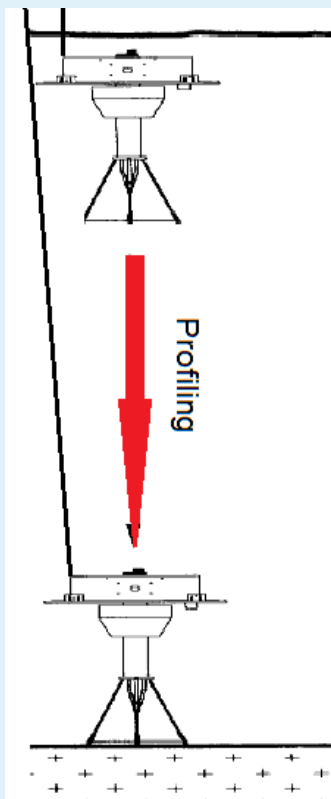


Schéma d'utilisation du SCAMP pour faire un profil descendant

Montants / Upward

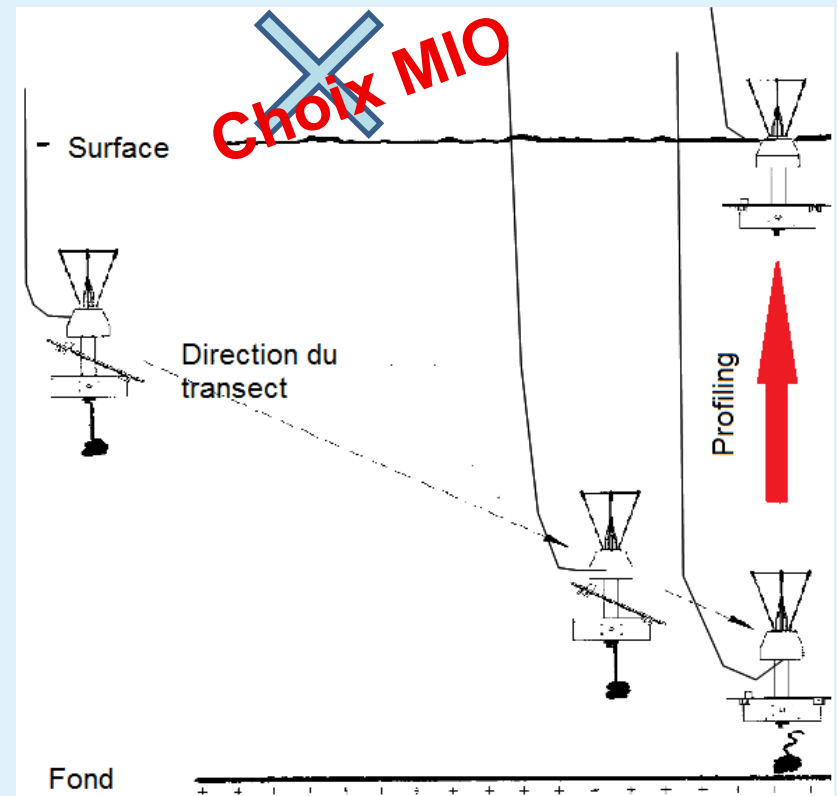
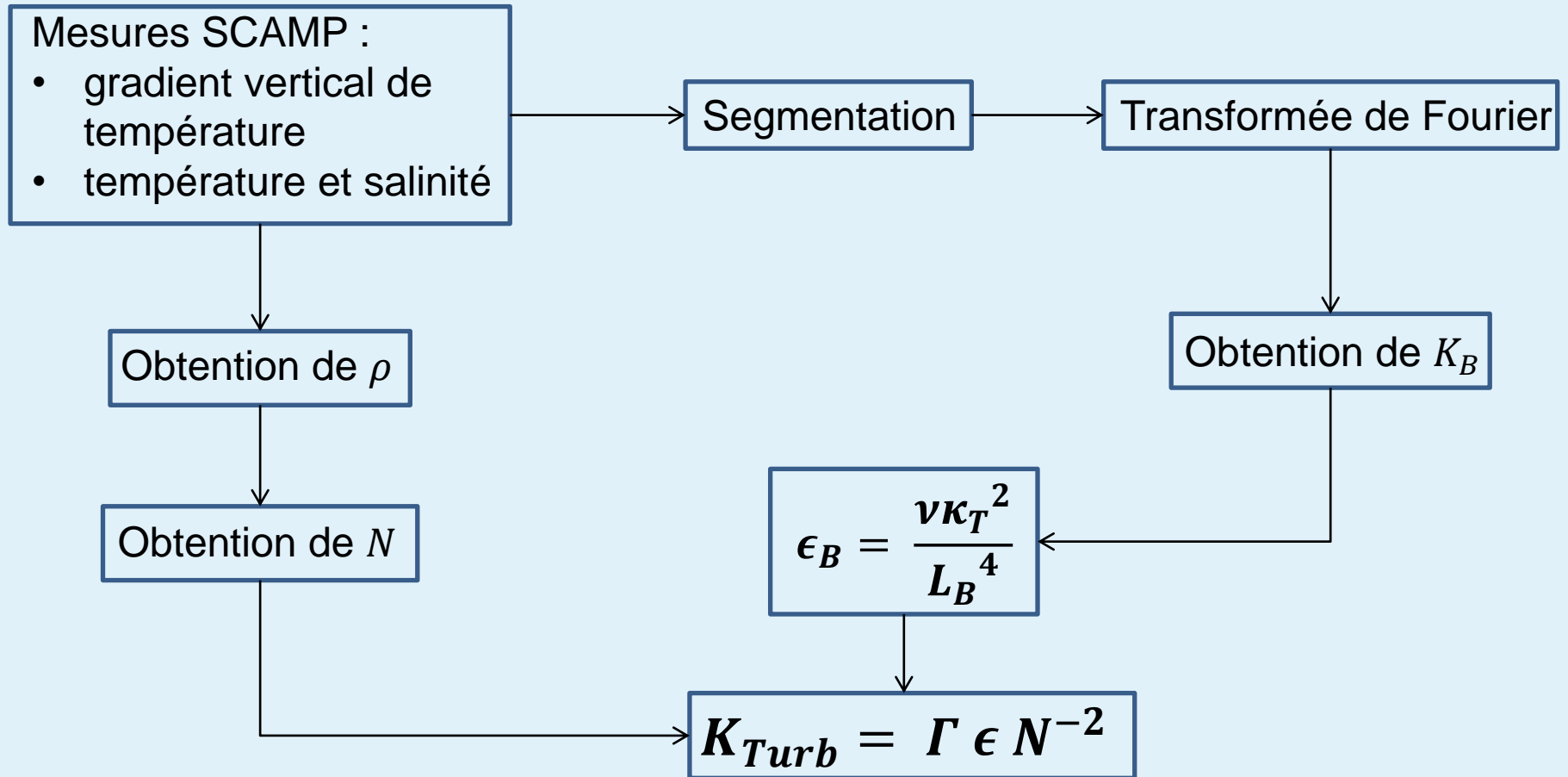
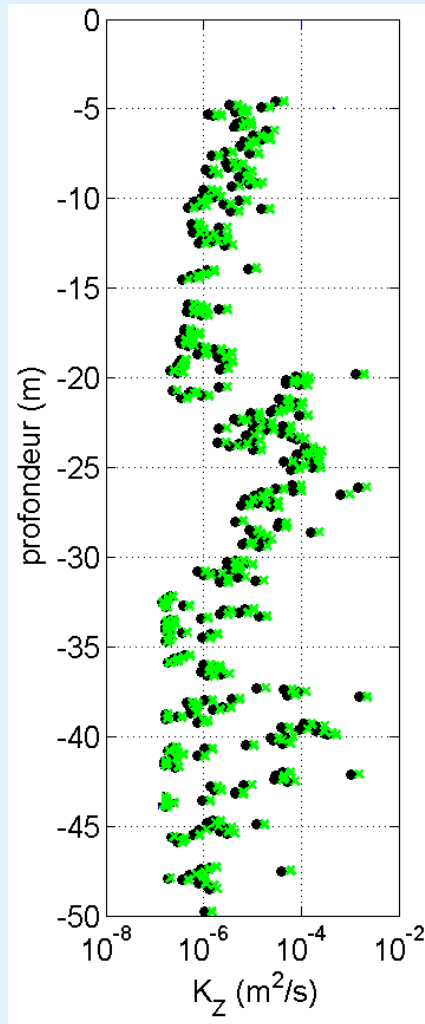


Schéma d'utilisation du SCAMP pour faire un profil montant

Résumé de la méthode de calcul



Étude de sensibilité au paramètre Γ



$\Gamma = 0,3$

$\Gamma = 0,2$

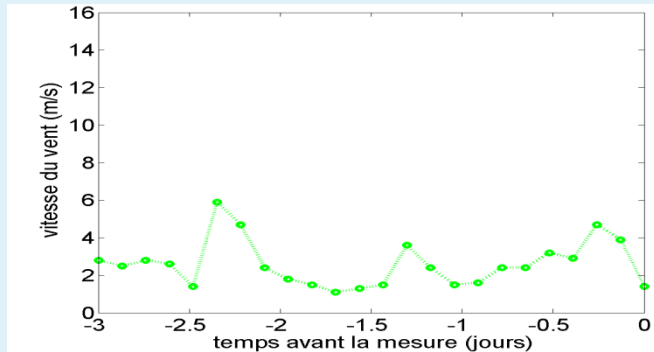
- Dans le schéma de *Gaspar et al. (1990)* : $\Gamma = 0,3$
- Pour l'utilisation de la méthode de *Osborn (1980)* : $\Gamma = 0,2$
- Peu d'évolution de K_z en fonction de Γ



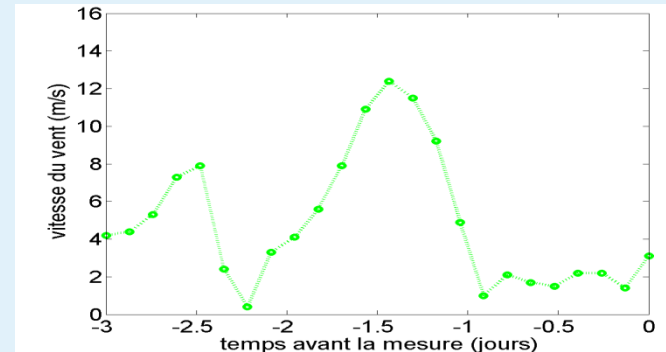
Conservation de $\Gamma = 0,2$

Profil de K_z du 11 juillet
à SOFCOM

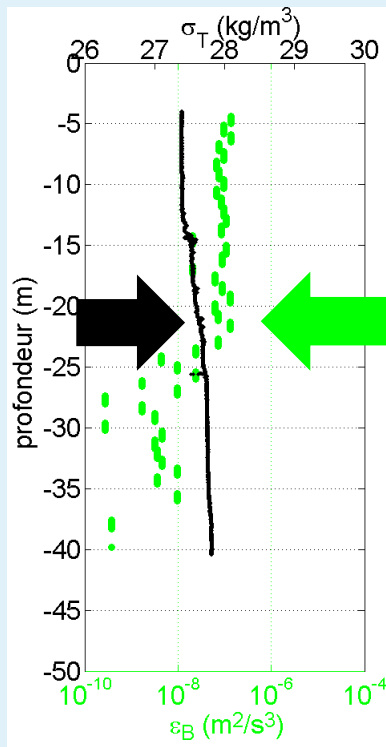
Couche de mélange vs mélangée



16 octobre



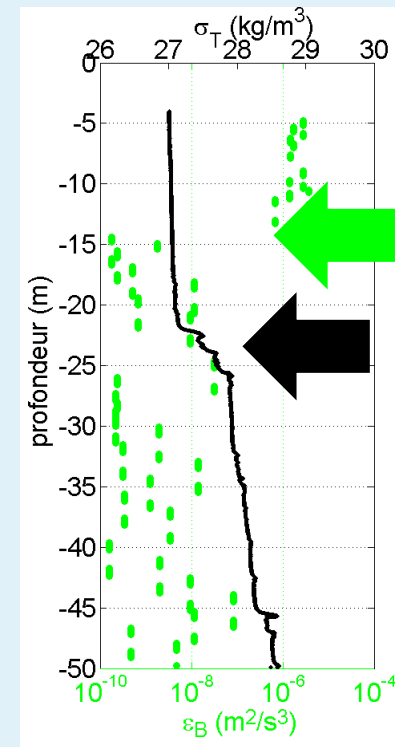
13 septembre



h_ϵ : Profondeur de la couche de mélange
 h_D : Profondeur de la couche mélangée

$$h_D \approx h_\epsilon$$

$$h_D > h_\epsilon$$



Couche d'Ekman

Profondeur sur laquelle l'action du vent est ressentie

$$D_E = \frac{\pi\sqrt{2}}{V_0 \rho_0} \frac{\tau_S}{f}$$

$$V_0 = \frac{0,0127 W}{\sqrt{\sin \lambda}}$$

$$\tau_S = \rho_{air} C_D W^2$$

C_D : Coefficient de traînée du vent

V_0 : Vitesse du courant de dérive

W : Vitesse moyenne du vent

Évolution de l'énergie cinétique de la turbulence

$$E_{CT} = 0,5 \overline{u'_i u'_j}$$

$$\frac{dE_{CT}}{dt} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{u'_j E_{CT}} + \frac{\overline{p' u'_j}}{\rho} \right) - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho_0} \overline{\rho' u_i} g \delta_{i3} + \epsilon$$

ϵ : Taux de dissipation visqueuse



Utilisée dans le schéma de *Gaspar et al. (1990)*

Calcul de K_z

Évolution de l'énergie cinétique de la turbulence

Schéma Gaspar et al. (1990) : modèles SYMPHONIE et MARS3D

$$\epsilon = \frac{C_\epsilon E_{CT}^{3/2}}{l_G}$$

C_ϵ : constante

l_G : échelle de longueur

C_0 : constante

Relation de Prandtl-Kolmogorov

$$v_T = C_0 \sqrt{E_{CT}} l_G$$

Schéma de Gaspar et al. (1990)

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \frac{C_{\epsilon} E_{CT}^{3/2}}{l_G} \\ K_Z &= C_0 \sqrt{E_{CT}} l_G \end{aligned} \right\} \text{ avec}$$
$$l_G = \frac{\sqrt{2}}{E_{CT}^{1/2} N}$$
$$C_{\epsilon} = 0,7$$
$$C_0 = 0,1$$

Constantes calibrées avec $\Gamma = 0,3$

Calcul de K_z

Méthode de *Shih et al. (2005)*

- Calcul de l'intensité turbulente :

$$I_T = \frac{\epsilon}{\nu N^2}$$

ϵ : taux de dissipation moyen de
l'énergie cinétique de la turbulence

N : fréquence de Brünt-Väisälä

ν : viscosité cinématique moléculaire

$$\nu = 1.10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Calcul de K_z

Méthode de *Shih et al. (2005)*

- Calcul de K_{Turb} avec le critère de *Shih et al. (2005)* :

Shih et al. (2005)

$$I_T < 7$$

$$K_{Turb} = 0 \Rightarrow K_z = \kappa_T$$

Osborn (1980)

$$7 < I_T < 100$$

$$K_{Turb} = \Gamma \epsilon N^{-2}$$

Shih et al. (2005)

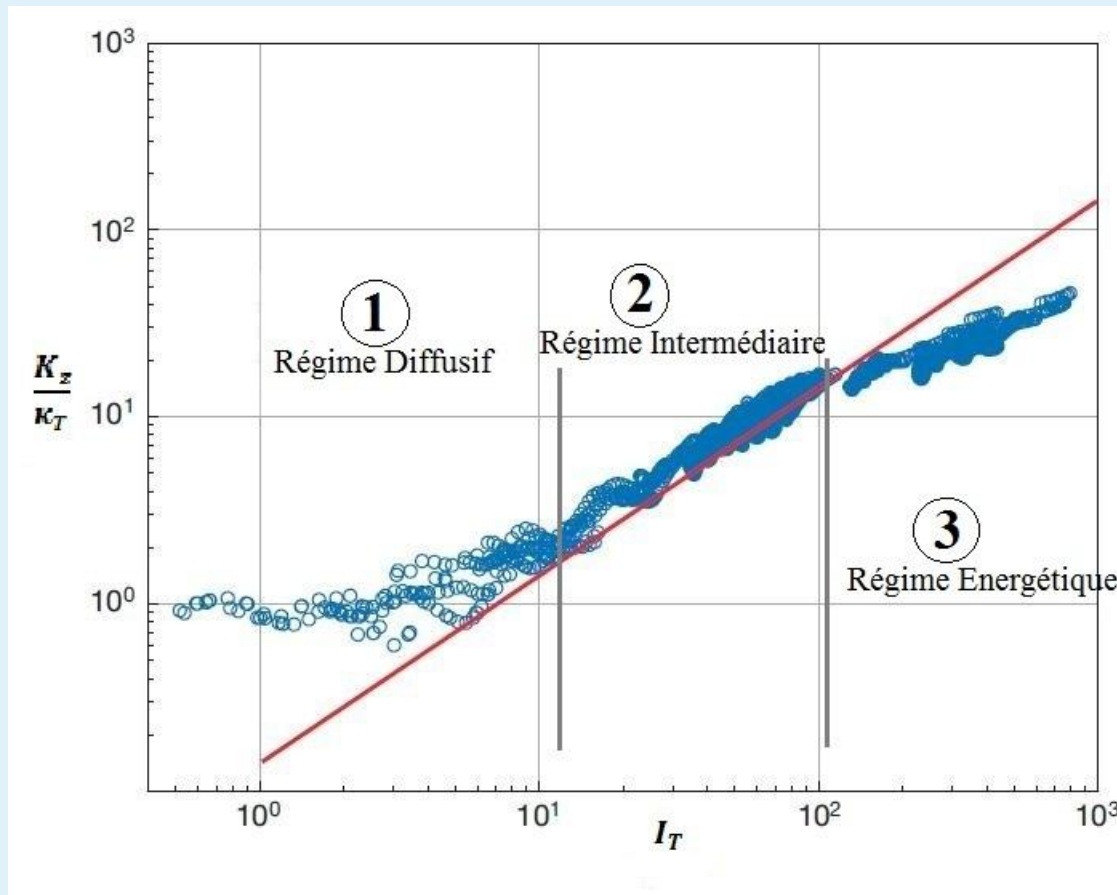
$$100 < I_T$$

$$K_{Turb} = 2 \nu \sqrt{I_T}$$

$$\kappa_T = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\Gamma = 0,2 : \text{Efficacité de mélange}$$

Méthode de Shih et al. (2005)



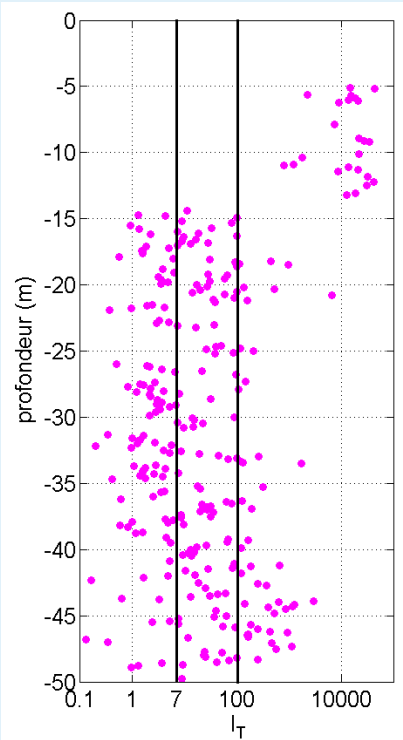
Simulations numériques
faisant varier Sh, R_i, ν

$$\Gamma = 0,2$$

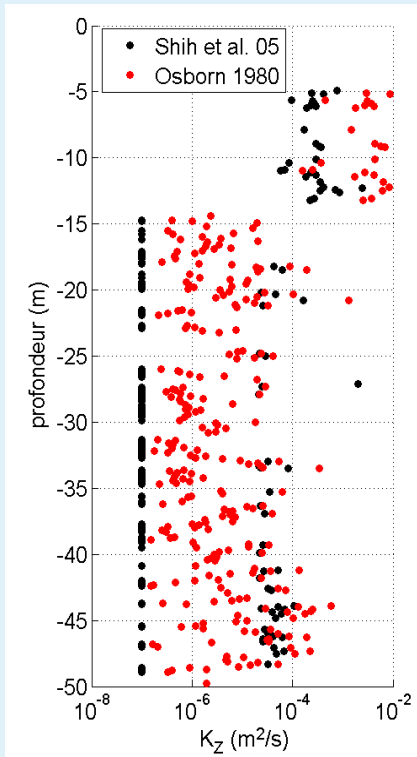
Image tirée et adaptée de Ivey et al. (2008), étude provenant de Shih et al. (2005)

Limites d'utilisation du critère de Shih

I_T au voisinage de 7



Profil vertical de l'intensité turbulente



Profil vertical de K_Z avec la méthode de Shih et al (2005) en noir et la loi de Osborn (1980) en rouge

Forte discontinuité de K_Z avec le critère de Shih et al. (2005)



Abandon de ce critère
(*Discussion Turbintermed 2012*)



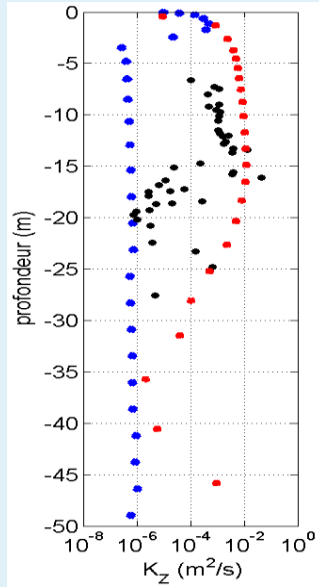
Utilisation de la formulation
de Osborn (1980) :

$$K_Z = \Gamma \epsilon_B N^{-2}$$

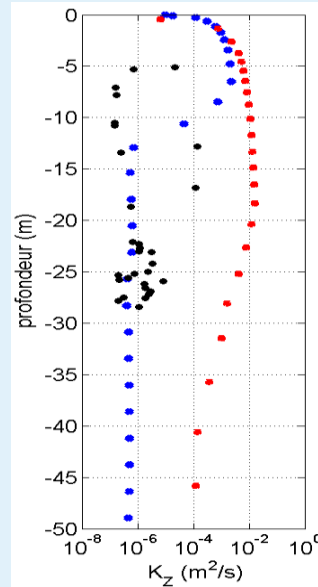
SOFCOM

Mesures SCAMP
SYMPHONIE
MARS3D

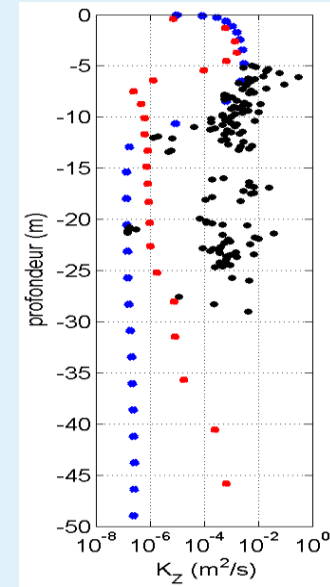
SYMPHONIE/MARS3D/SCAMP



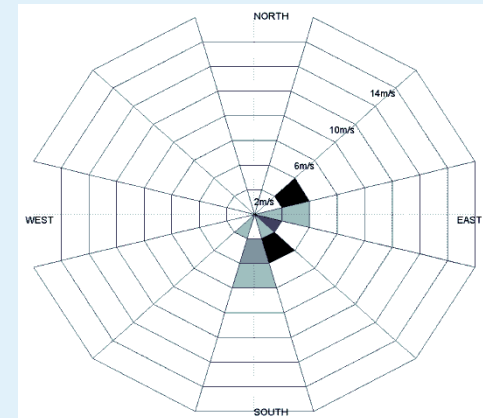
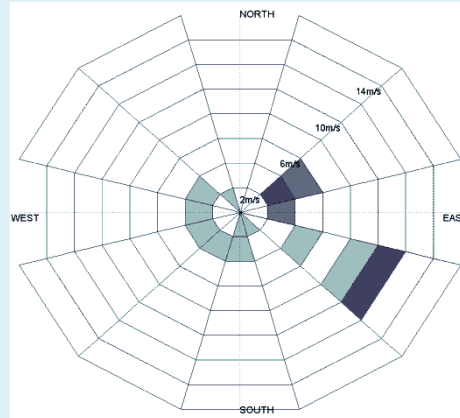
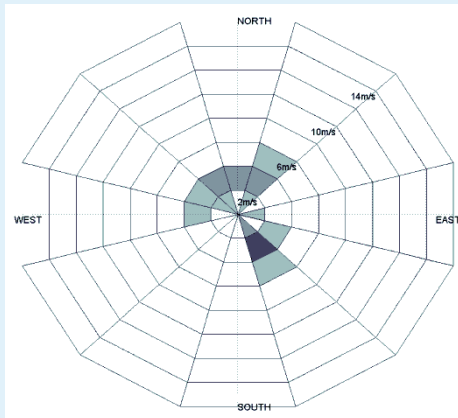
Février



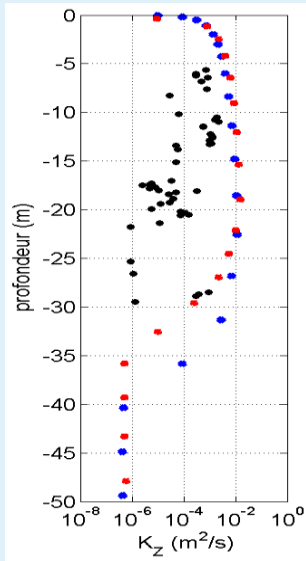
Mars



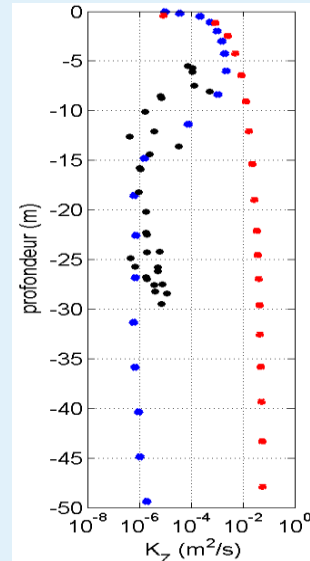
Avril



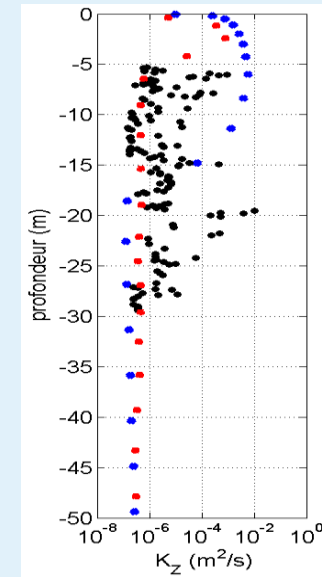
JULIO SYMPHONIE/MARS3D/SCAMP



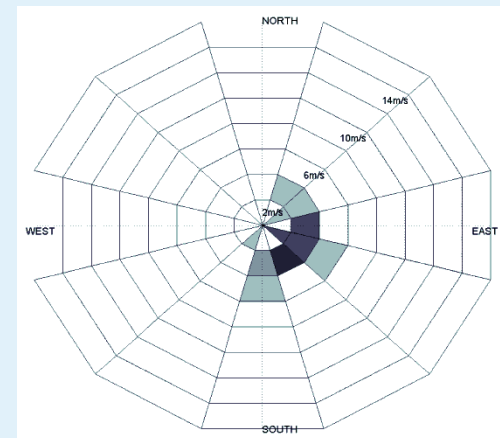
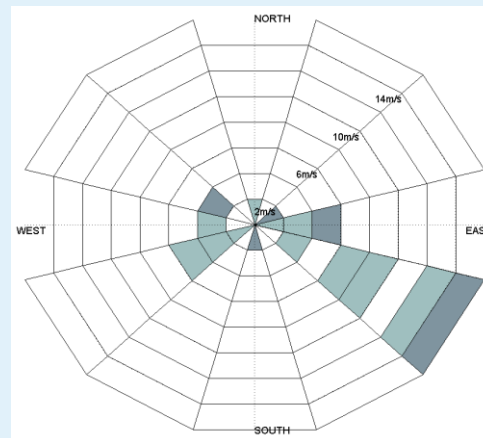
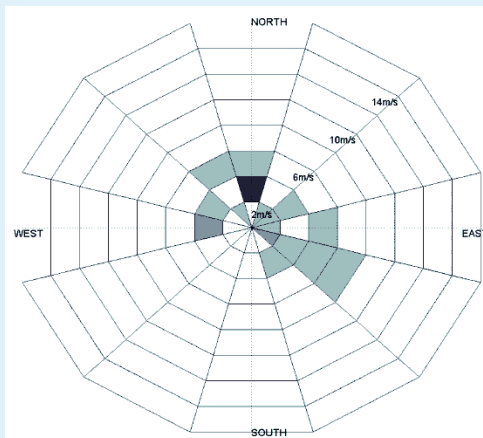
Février



Mars

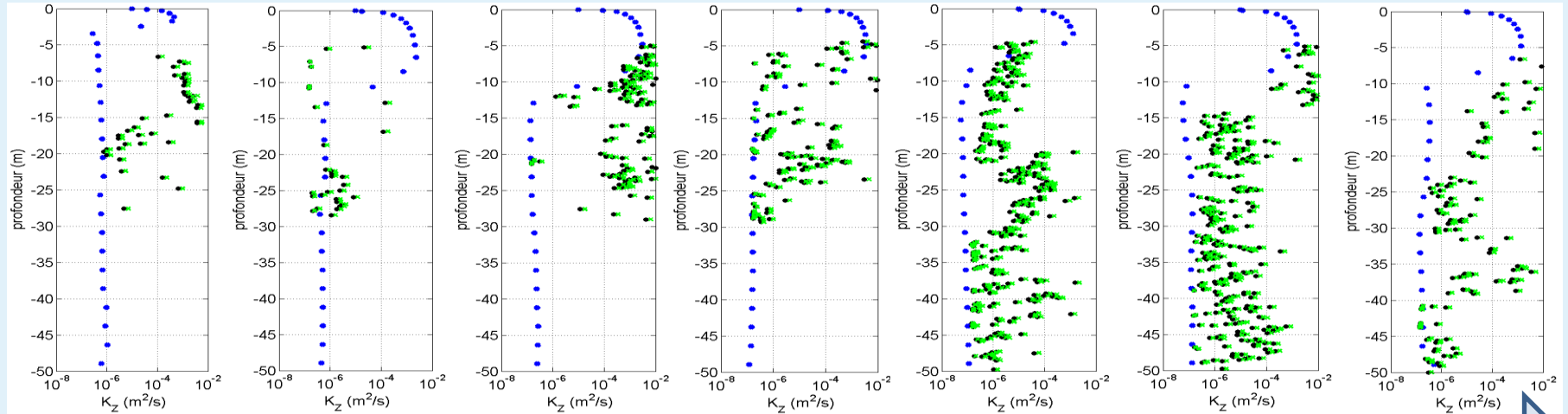


Avril



MARS3D/SCAMP

SOFCOM



Février

Mars

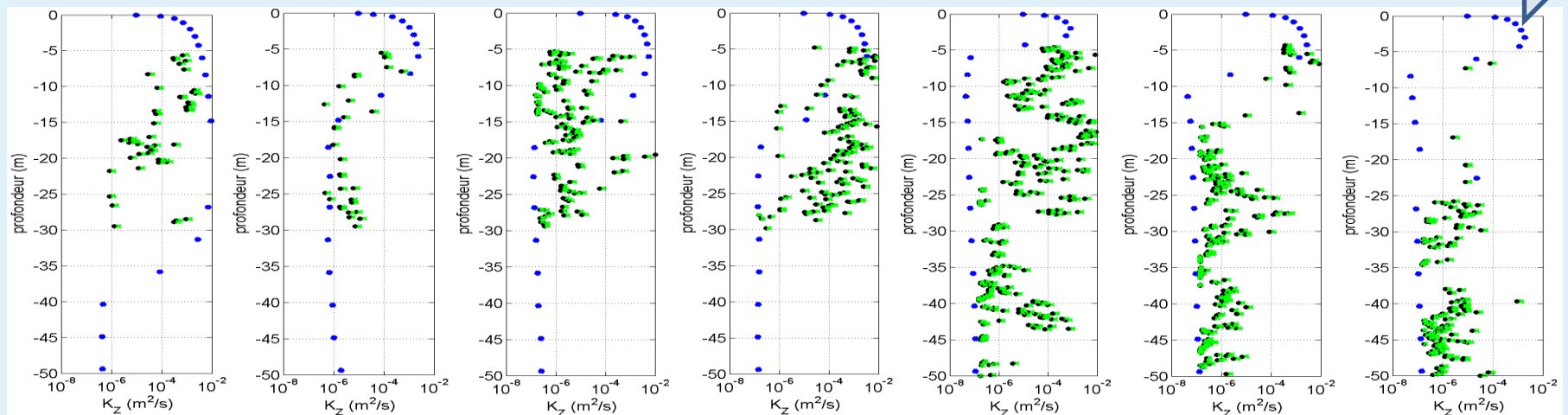
Avril

Mai

Juillet

Septembre

Octobre



JULIO