

**Programme Opérationnel FEDER-PACA; mesure 3.2.2 :
« Appui à la mise en œuvre de programmes de gestion intégrée de l'eau
et des milieux, et à la gestion multi-usage de l'eau »**

Projet LAGUNA

Etude expérimentale et numérique des processus de couplage entre dynamique hydro-sédimentaire et résilience des herbiers dans les lagunes saumâtres en eau peu profonde, en vue de la reconquête des phanérogames aquatiques dans les étangs de Berre et de Bolmon, et de la restauration de la biodiversité.

**Bernard ROUX, Elena ALEXEENKO, Samuel MEULE, Richard KOTARBA, Paul G. Chen
et co-auteurs**

**M2P2, CEREGE, IRPHE, REC-TIT-Taganrog (Russie)
coopération GIPREB (gestionnaire Berre) et SIBOJAI (gestionnaire Bolmon)**

1 - Position du problème

2 – Partenariats

3 - Buts et méthodologie

**4 - Premiers résultats: expériences in situ (APO-PACA-2008 + MAEE-ARCUS-Russie)
et simulation numérique (réseau MESR-DREIC + MAEE-ARCUS-Russie)**

5 – Conclusions et perspectives (FEDER)

Position du problème: recolonisation des herbiers aquatiques

L'étude s'insère dans le programme des actions de connaissance en cours sur l'étang de Berre. Elle vise à connaître l'influence de l'hydrodynamique (et en particulier des vagues de vent) sur le transport sédimentaire dans les aires d'enracinement de phanérogames aquatiques dans les lagunes saumâtres en eau peu profonde.

- ♦ une régression importante des zostères est observée depuis des décennies dans l'Etang de Berre (Boudouresque et Bernard, 2004).
- ♦ le suivi écologique mené par le GIPREB (2006-2009) confirme la régression.
- ♦ l'influence de la dynamique hydro-sédimentaire sur le système racinaire des herbiers est probablement l'un des mécanismes majeurs responsables de cette régression.
- ♦ Le GIPREB est sur le point de mettre en place une intéressante action de recolonisation de zostères dans plusieurs aires en bordure de l'étang de Berre.
- ♦ La réussite de cette action devrait être favorisée par la mise en place de systèmes de protection des aires de recolonisation contre l'action des vagues de vent.

**La recolonisation des zostères dans l'étang de Berre mené par le GIPREB est importante dans l'optique de l'objectif 2021 de la DCE;
c'est un problème très complexe qui nécessite un apport scientifique très fort.**

Position du problème : dynamique hydro-sédimentaire

Le contexte environnemental est le suivant:

- ♦ Vents très fréquents, intenses et irréguliers dans le temps et dans l'espace (cf. les données météo de trois sondes EDF et des deux stations METAR);
- ♦ influence des vagues de vent et des courants de fond sur la remobilisation des sédiments au niveau des systèmes racinaires des herbiers.
- ♦ Deux mécanismes possibles de transport sédimentaire, signalés par le GIPREB:
 - recouvrement par des vases en période de crue des tributaires;
 - érosion du sol près des rhizomes, avec effet possible d'emballlement (au dessous d'une densité critique)

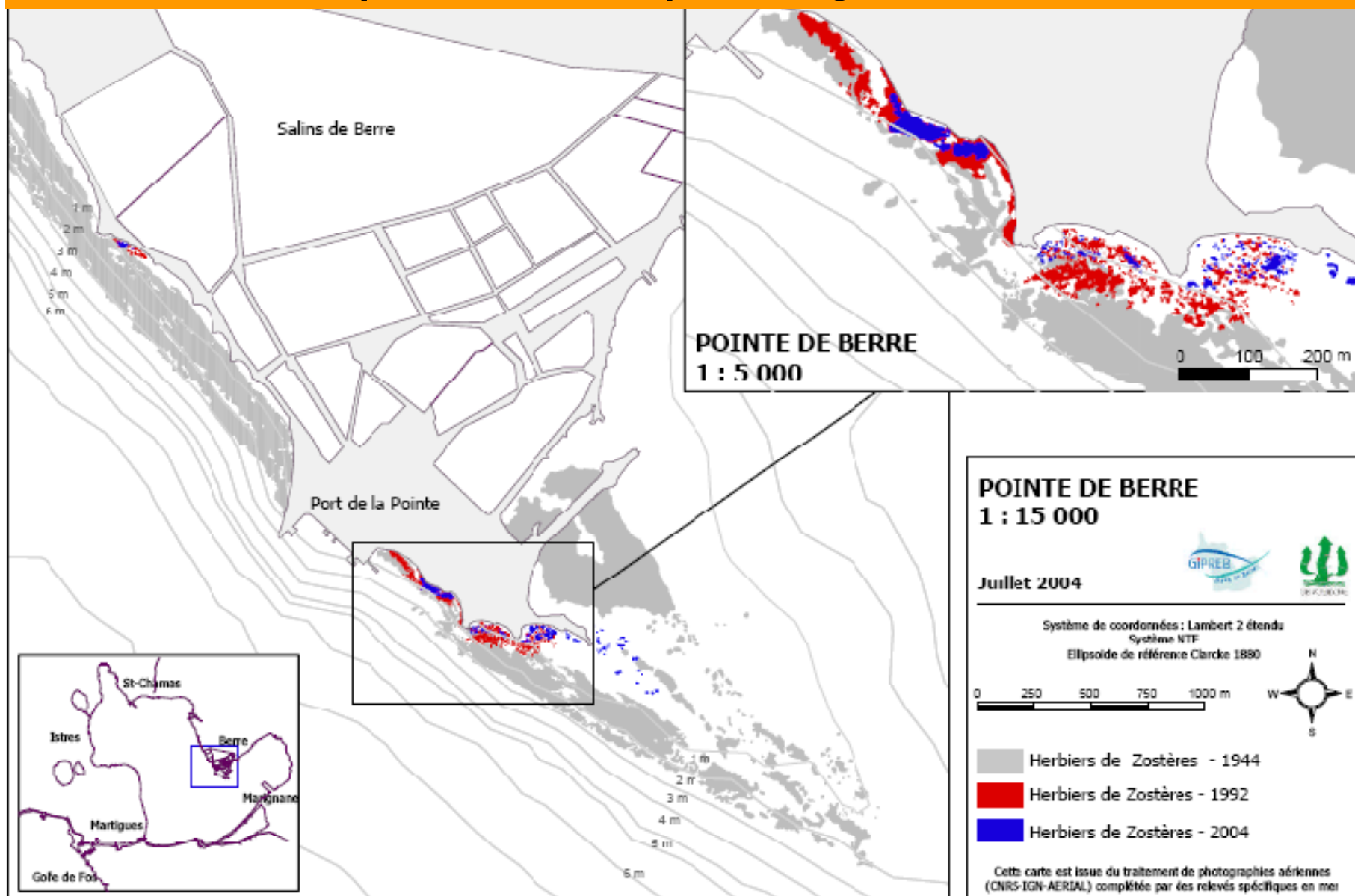
**Principaux mécanismes à considérer au niveau courantologie
(moteur de la dynamique sédimentaire):**

- ♦ débit hydrique d'eau douce (apports des tributaires et du canal usinier EDF)
- ♦ débit hydrique d'eau marine (via Caronte; marée semi-diurne)
- ♦ effet du vent (courant cisailé en surface; condition limite de type « toit rigide »)
- ♦ effet vagues de vent (courant orbital additionnel en surface, et mélange vertical)

Partenariats

- ♦ Le projet et les études préliminaires sont menés par les laboratoires partenaires (M2P2, CEREGE, IRPHE et « Taganrog Institute of Technology » dans le cadre d'un accord de coopération universitaire et scientifique avec l'Ecole Centrale Marseille, et en étroite concertation avec le **GIPREB**, chargé du suivi des herbiers dans l'étang de Berre.
- ♦ Le suivi de la dynamique hydro-sédimentaire (Altus + ADV) est mené en collaboration avec GLADYS-Montpellier, ce partenariat permettra de déployer pour quelques périodes, d'une à deux semaines, les nombreux équipements dont dispose
- ♦ Le volet modélisation est développé dans le cadre d'un accord d'utilisation du code MARS-3D avec IFREMER, pour un travail de thèse.
- ♦ Des études modèles seront possibles en canal hydraulique par deux équipes de l'IRPHE (cf. projet Hydrosys-APO-PACA-2008), lorsque les mécanismes de essentiels auront été confirmés.
- ♦ Nous développerons les échanges de résultats scientifiques avec la Tour du Valat, qui a réalisé une étude intéressante de résilience de zostères dans l'étang de Vaccarès (cf. Charpentier, Grillas et al. , 2005).

Position du problème: exemple de régression des herbiers



Exemple de régression des zostères à la Pointe de Berre; cf. Boudouresque et Bernard (2004)

Buts généraux

- ♦ **Comprendre le rôle de la dynamique hydro-sédimentaire sur les systèmes racinaires des herbiers**
- ♦ **Etude expérimentale (in situ), théorique et numérique de la dynamique hydrosédimentaire dans les écosystèmes lagunaires saumâtres de faible profondeur;**
- ♦ **influence des courants de fond sur la remobilisation des sédiments dans les zones de résilience et/ou de recolonisation des phanérogames aquatiques.**
- ♦ **Modélisation de la courantologie + salinité 3D, avec système d'emboîtement pour l'étude fine de quelques aires de régression, de résilience et/ou de recolonisation, qui font partie des cibles du gestionnaire.**
- ♦ **Modélisation du transport 3D de particules, dans un environnement d'herbiers clairsemés.**

Buts particuliers:

- **Vérifier si l'énergie du courant (en particulier celui induit par les vagues de vent) sur le système racinaire constitue un facteur déterminant pour la régression d'herbiers;**
- **fournir des outils numériques d'aide à la décision pour optimiser le positionnement et le dimensionnement de systèmes de protection des aires de recolonisation.**

Méthodologie

Etude expérimentale (in situ) :

- ♦ dynamique sédimentaire (station Altus + ADV) à proximité du système racinaire;
- ♦ profil de courant (ADCP) du côté de la « frontière ouverte »;
- ♦ caractérisation des vagues de vent (transects; ligne de capteurs) dans les aires étudiées;
- ♦ observation des trains de vagues par photos aériennes, pour différentes vitesses des vents dominants

Modélisation et simulation numérique :

- ♦ bassin en eau peu profonde (caractérisé par la condition $kh < 1$ ($2\pi h < \lambda$), avec k – nombre d'onde, h - hauteur de la colonne d'eau et λ - longueur d'onde.
- ♦ hydrodynamique 3D , avec modèle d'emboîtement permettant l'utilisation de maillages métriques dans les aires étudiées
- ♦ photos aériennes pour l'observation des trains de vagues et de leur impact sur les zones de recolonisation, pour différents valeurs de vitesses des vents dominants

Etude théorique des courants de fond générés par les vagues de vent, et des déferlements; incluant l'interprétation de photos aériennes (trains de vagues; longueur d'ondes, hauteur de vagues)

Mesures in situ

Trois séries de mesures (Sept. 2006 et Juin 2008) réalisées dans l'Etang de Berre and l'Etang de Bolmon.

- profondeur
- distribution de vitesse 3D et profils, par ADCP
- Température, salinité, turbidité, oxygène dissous



ADCP Workhorse 600 Sentinel

- Depth range 70 m.
- Freq. 600 kHz.
- Precision 0,25%

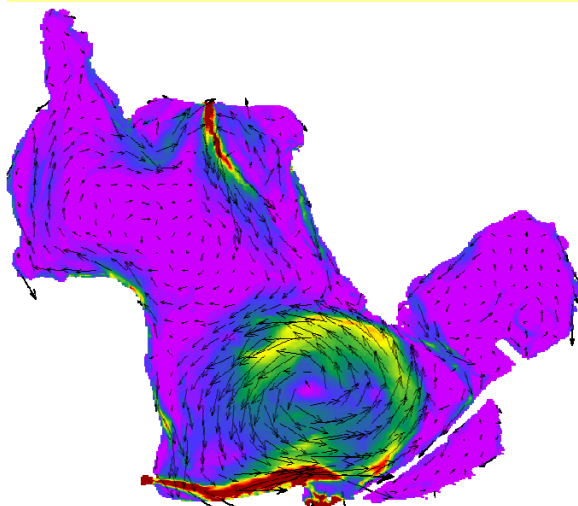
Courantologie Etang de Berre (MARS-3D)

Equations de Navier-Stokes 3D

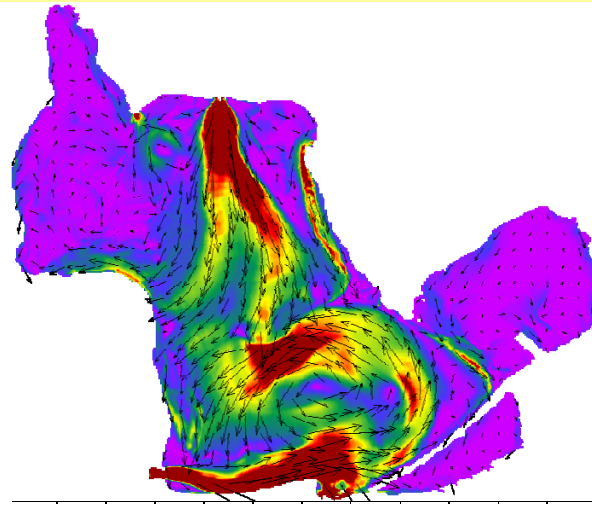
- + approximation de Boussinesq
- + hypothèse hydrostatique pour la pression
- + paramétrisation de la viscosité turbulente
- + couplage avec équations de conservation de l'énergie et des espèces (T, C)

Transformation de la coordonnée verticale, adaptée entre la surface libre et le fond.

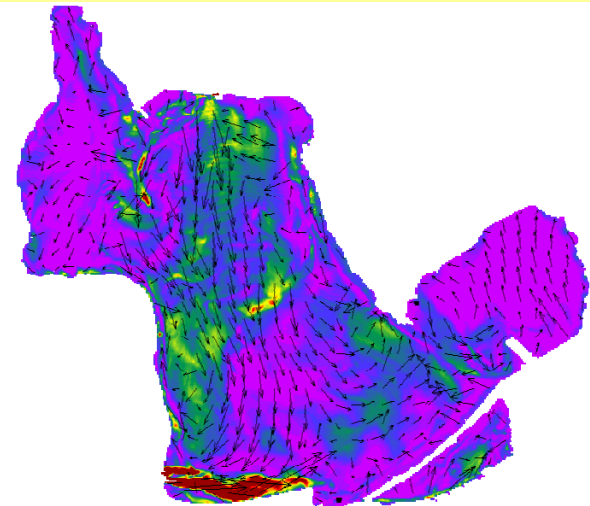
MARS3D pour l'Etang de Berre (effet de marée via Caronte, canal usinier EDF, vent N-NE mistral); champ de vecteur (palette – basé sur le carré du module de la vitesse horizontale)



Barotropic flow



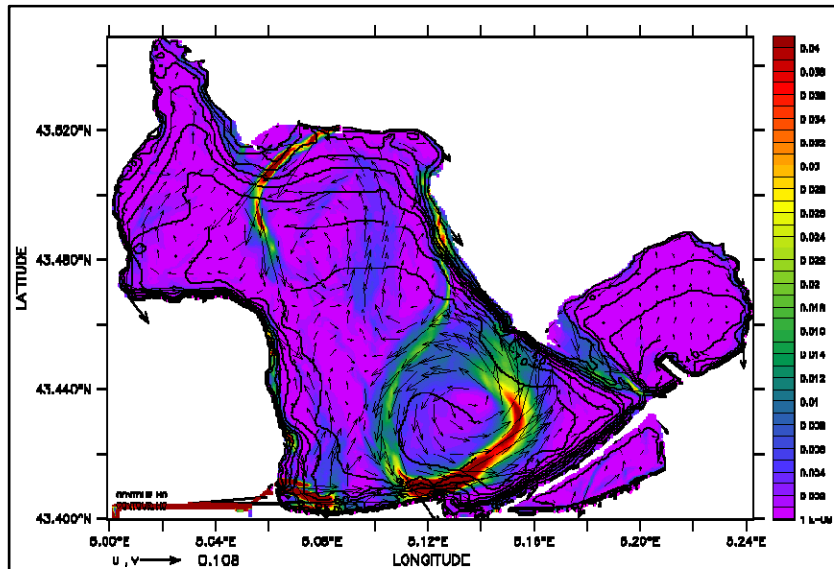
Near free surface flow



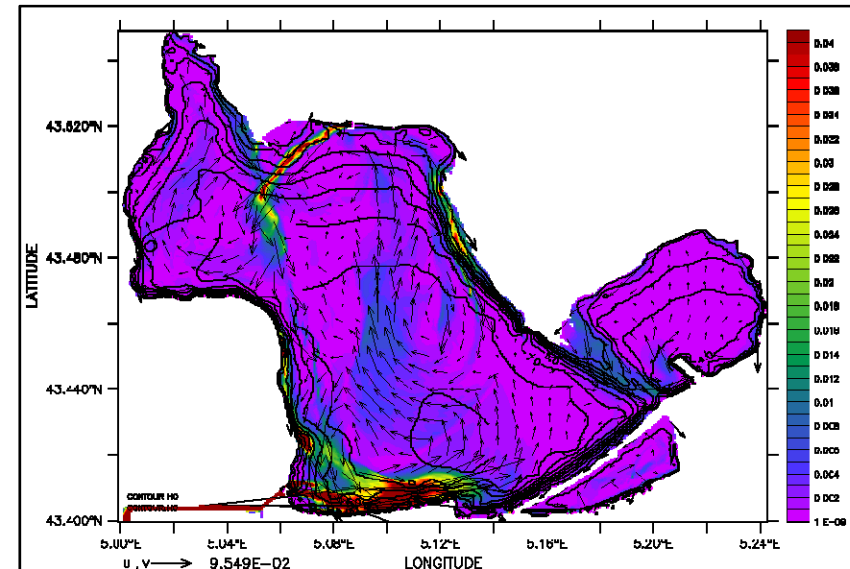
Near bottom flow

Evolution des courants barotropes

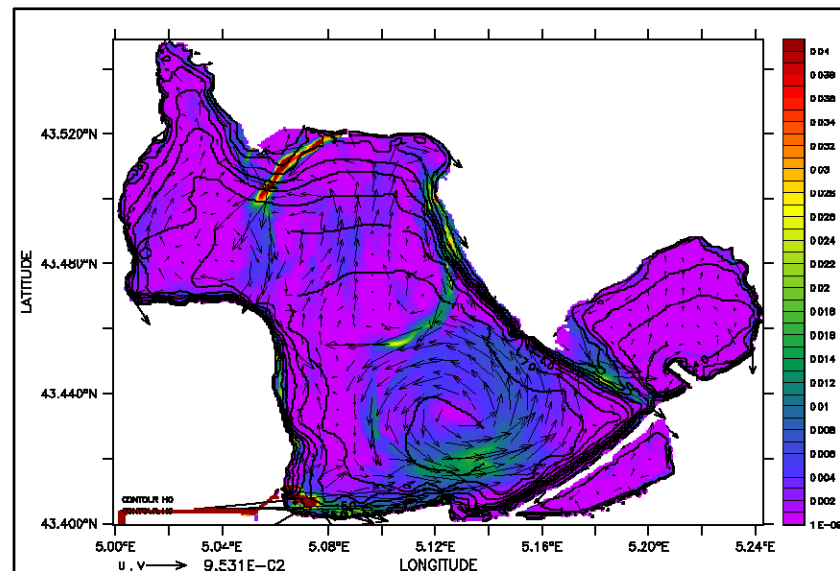
One day after the beginning of simulation



Two days after the beginning of simulation

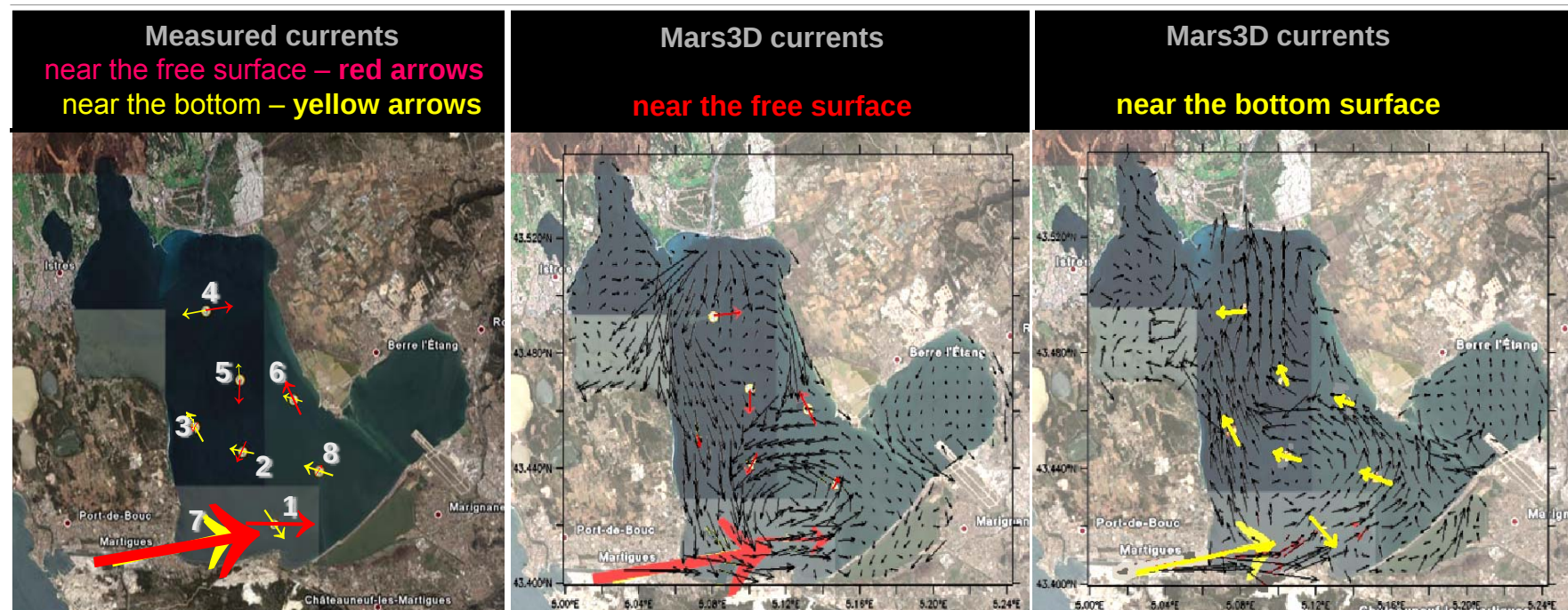


Three days after the beginning of simulation



Superposition des résultats numériques (champ de vecteurs vitesse) et des résultats expérimentaux par ADCP de septembre 2006

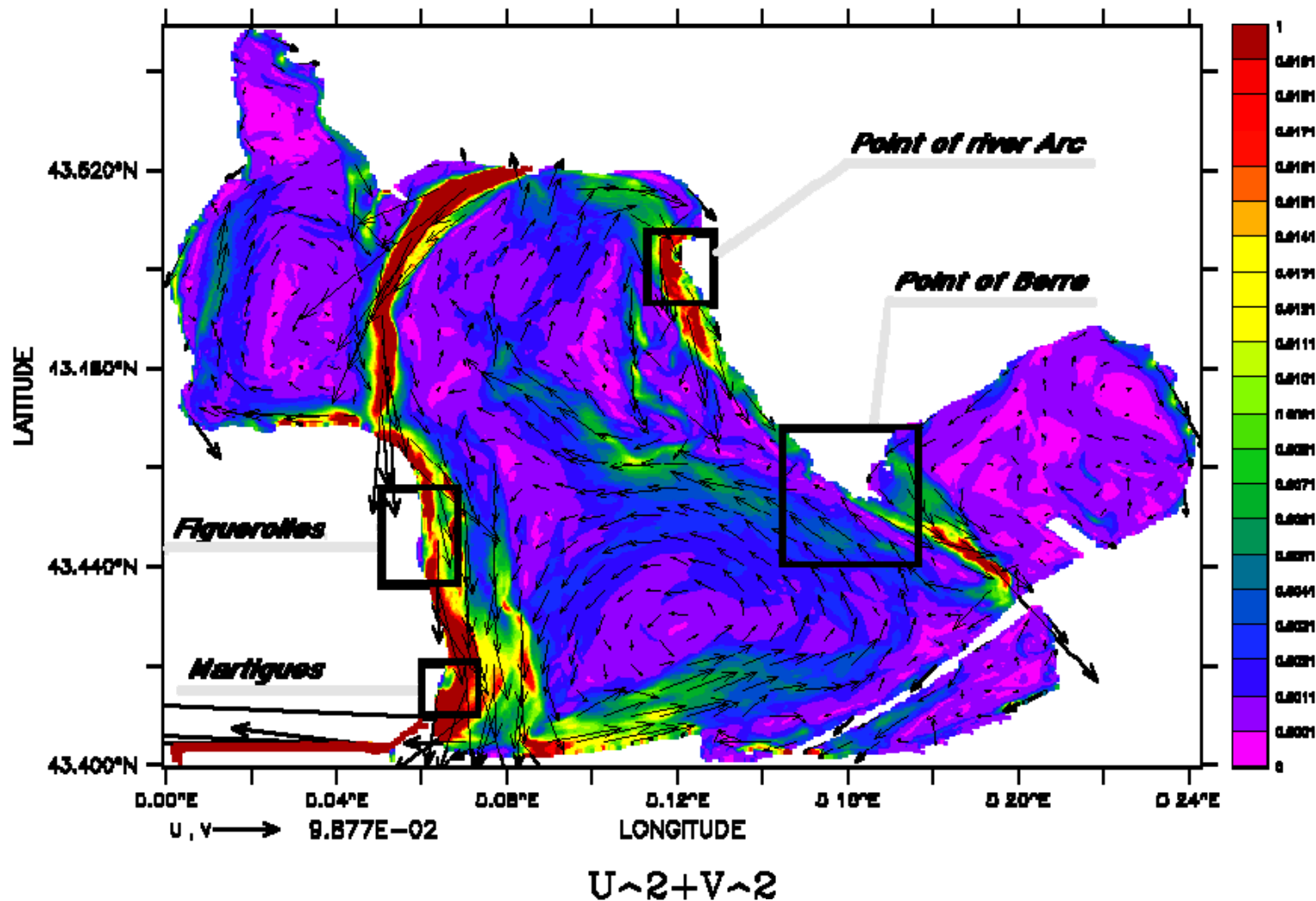
- Qualitatively we have similar directions of currents in the place of the main vortex
- Vertical profiles of horizontal velocity components are similar with measurements in 4 control points (station - 2, 5, 6, 7) from 8. This result means, that we need to calibrate configuration and also to do more measurements for having data in more points of the lagoon Etang de Berre



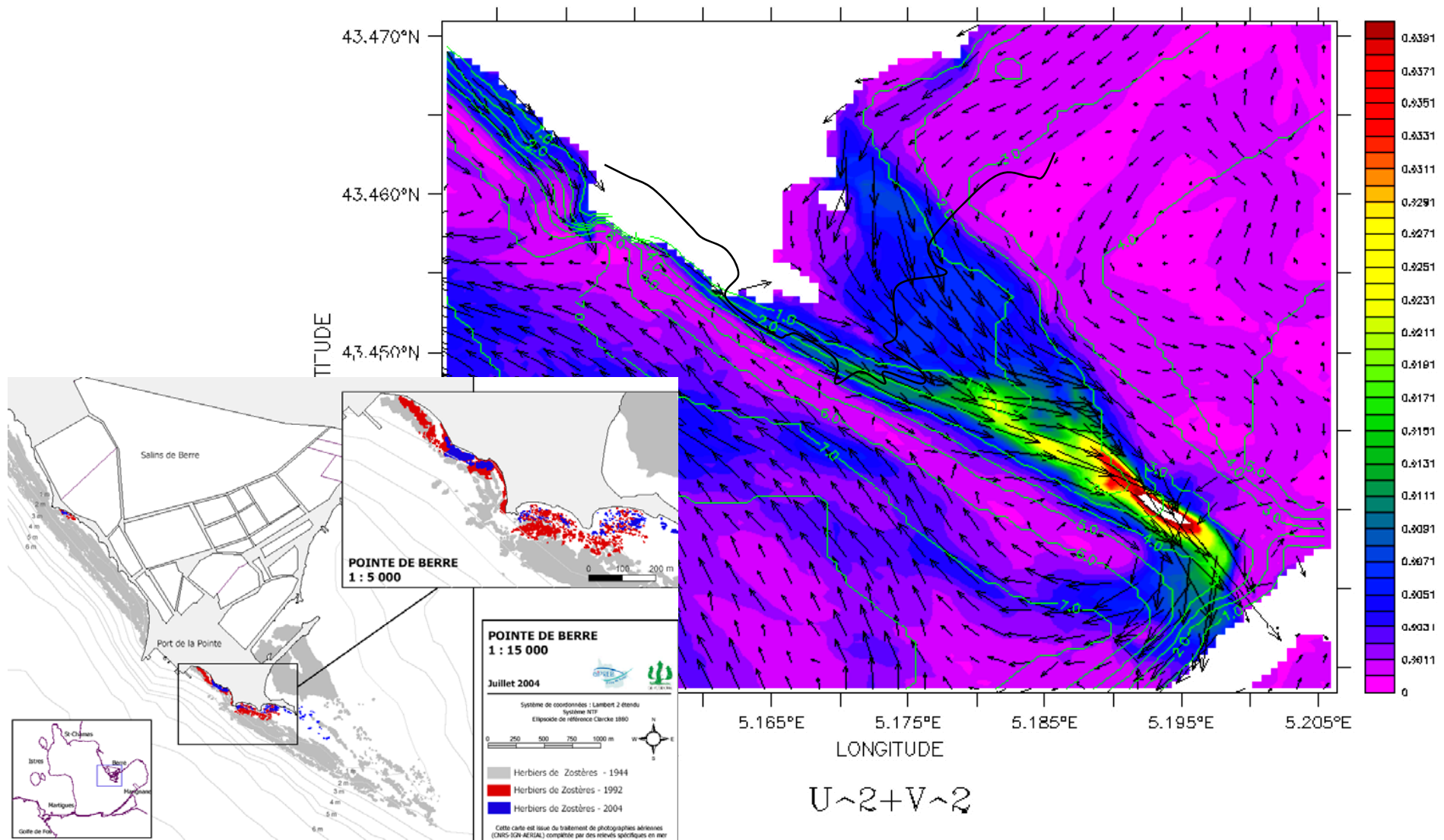
Marée + mistral N-NW 5 m/s + débit canal usinier EDF (200 m³/s)

TIME : 06-SEP-2000 00:00

Modélisation MARS-3D avec emboîtement (AGRIF)

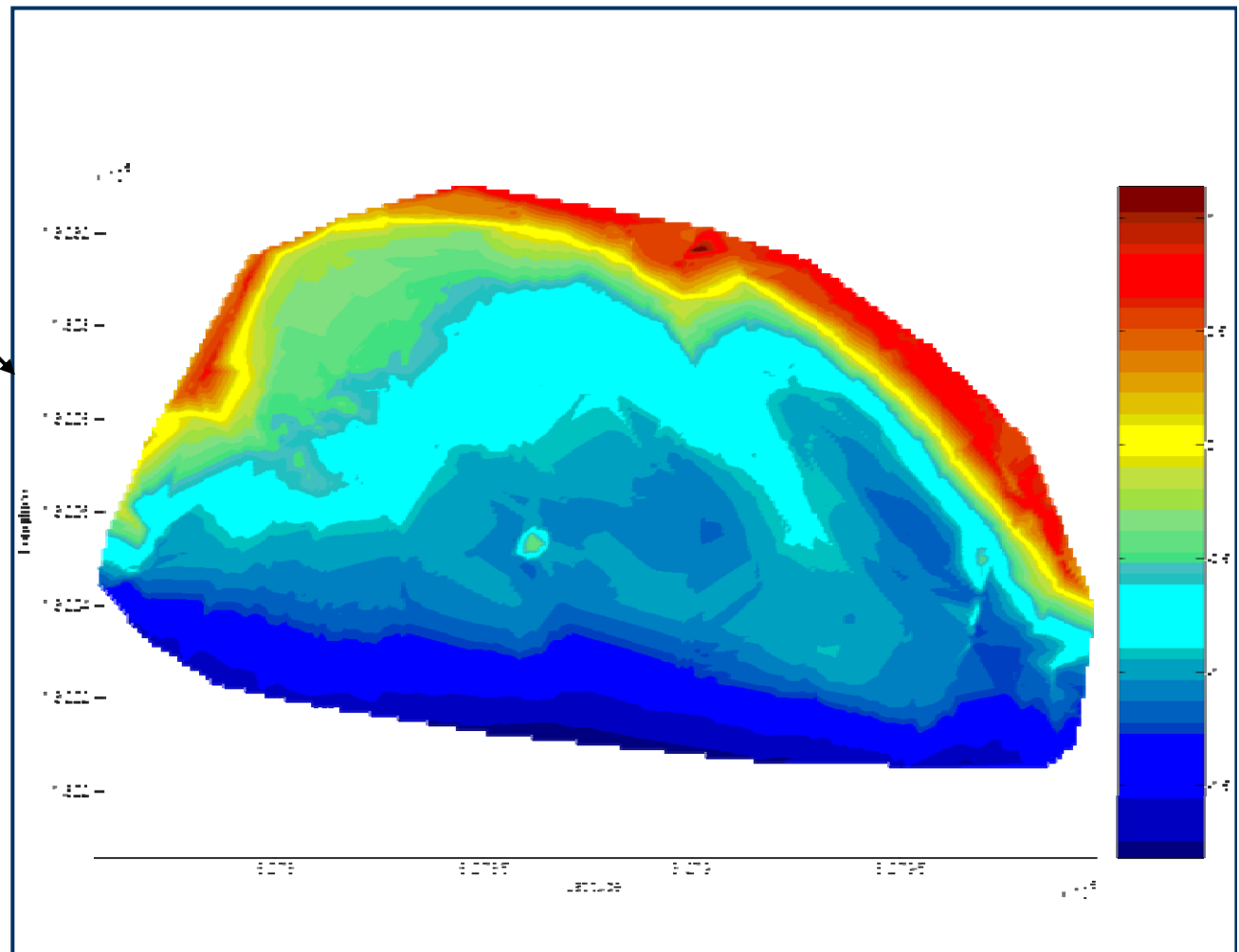
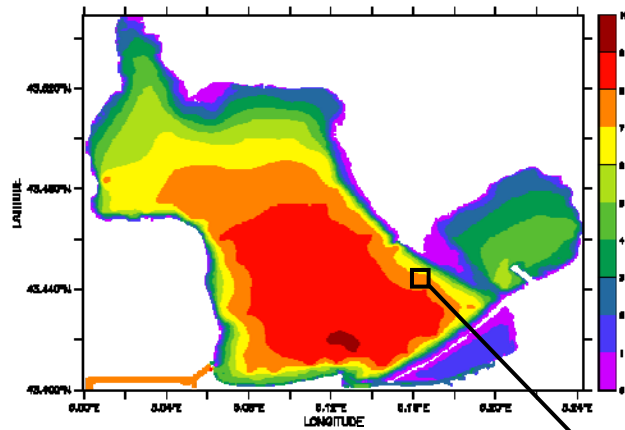


Pointe de Berre (zoom des régions de regression des phanérogames) Marée + mistral N-NW 5 m/s + débit canal usinier EDF (200 m³/s)

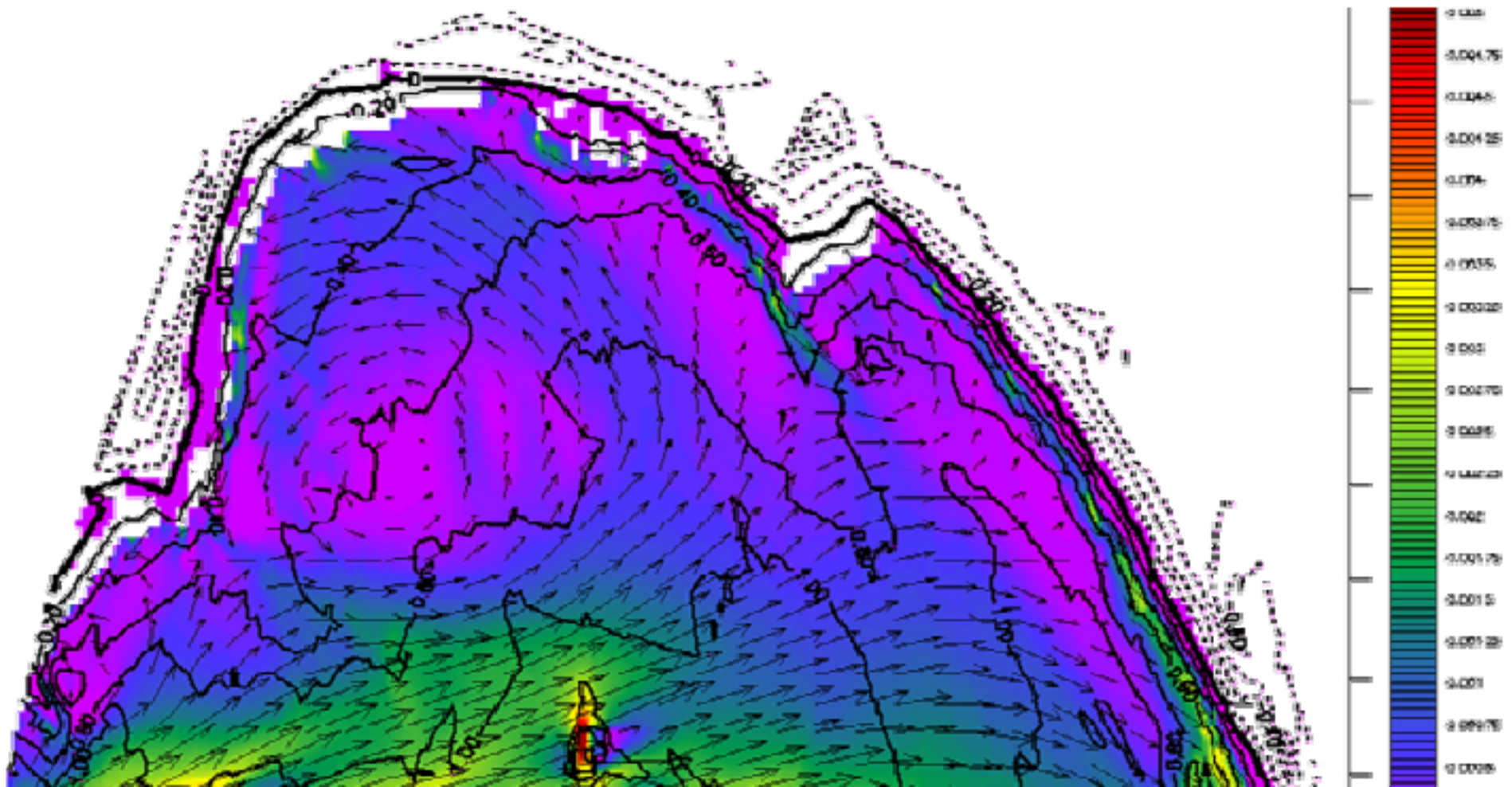


Bathymétrie de la Pointe de Berre (résolution 1 m)

mesures effectuées en Juin 2009 par GPS
(Samuel Meulé; CEREGE)



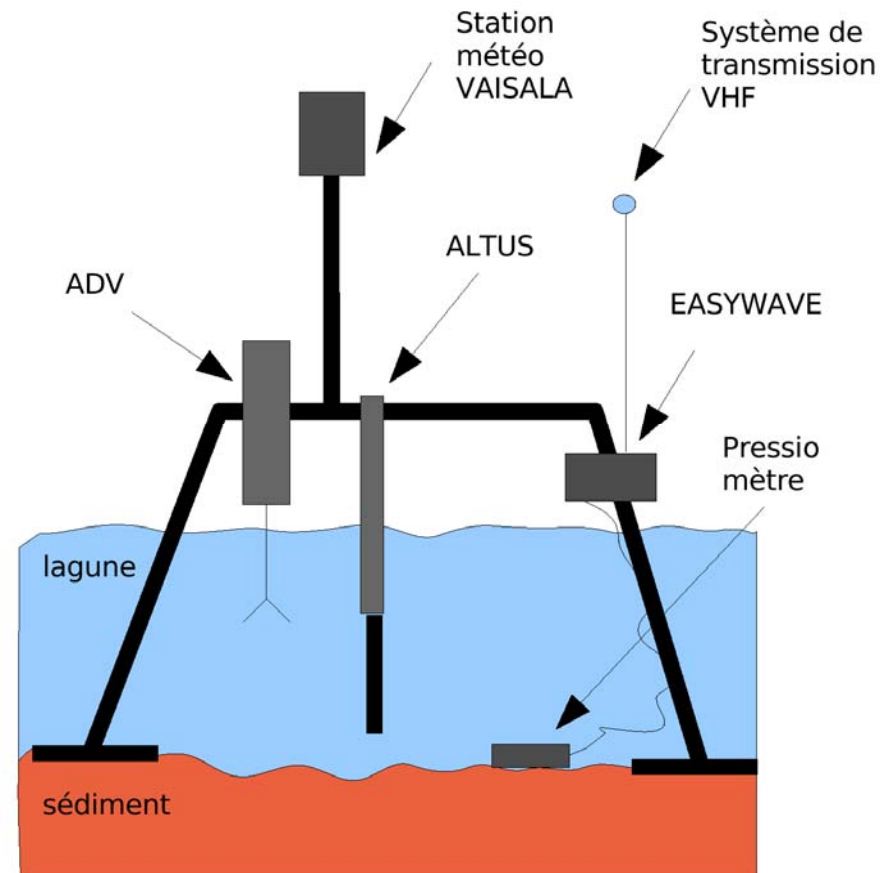
**Pointe de Berre (anse 1)
courants dans la couche de fond (20-40 cm)**



**Etudes prévues prochainement:
suivi hydro-sédimentaire (Altus + ADV); coopération GLADYS
Groupe d'Etude de l'Hydrodynamique et de la Dynamique
Sédimentaire Littorale (Géosciences-Montpellier; Univ. Montpellier-2).**

Station LAGUNA : ensemble d'équipements embarqués dans une cage porteuse adaptée à un déploiement sur fond mou:

- station météorologique : vent, température de l'air, humidité, pluviométrie par impacts
- altimètre ALTUS : mesure des taux d'érosion et de dépôt du sédiment.
- pressiomètre EASYWAVE, acquisition et transmission VHF des paramètres: hauteur de colonne d'eau et caractéristiques des vagues (hauteur, période),
- ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) : 3 composantes du courant de fond.



Laguna est conçu pour stocker les données sur plusieurs mois.

Mesures additionnelles des caractéristiques des vagues de vent; photos aériennes

- ❖ Des mesures additionnelles des caractéristiques d'ensemble des vagues de vent (longueur d'ondes et hauteur de vagues) seront effectuées à partir du traitement d'images de photo aériennes.
- ❖ Pour ce faire, on utilisera d'abord les photos existantes (GIPREP, IGN, Atmopaca, etc..)
- ❖ On développera des moyens d'investigation avec des moyens légers et faciles à déployer sur les zones de recolonisation, dans les conditions de vent substantielles (allant jusqu'à 50-60 kmh, au moins).
- ❖ Ce développement sera effectué avec divers spécialistes, déjà identifiés, en matière d'aérophoto (cerf-volants), d'appareillage photo, de stéréo-photos et de traitement des images aériennes.



Thèse G. Bernard (2007) ; Figure 13. ; Encadré rouge = site témoin des anses de la Pointe de Berre pour le suivi de la dynamique des herbiers résiduels de *Zostera noltii* en 2004 et 2006

Modèles pour le transport de Sédiment

Deux modèles pour le transport sédimentaire 3D seront utilisés:

- le modèle inclus dans le code MARS-3D
- le modèle développé par le REC (Research Education Center) du TIT-Taganrog

Modèle développé par le REC-Taganrog

- Ce modèle tient compte de :
 - Diffusion et advection
 - Sédimentation
 - interactions mutuelles (agrégation, désagrégation) de plusieurs types de suspensions
 - interaction des suspensions avec le fond et avec la surface libre.
- Ce modèle a été appliqué par le REC-Taganrog pour:
 - Reconstitution du désastre écologique de la Mers d'Azov (anoxie; été 2001)
 - Dispersion dans l'océan Pacifique de sédiments résultants de l'extraction de nodules de manganèse par pompage des fonds océaniques.

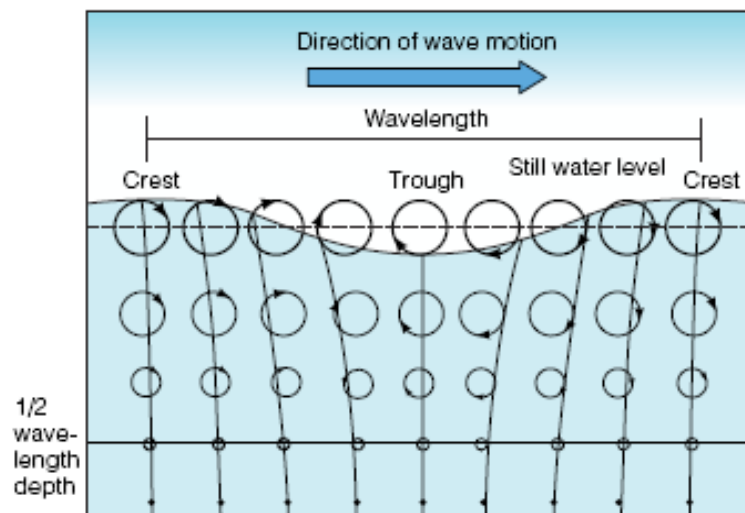
Conclusions et perspectives

- ◆ Les premiers résultats obtenus par voie expérimentale (ADCP) et par voie numérique sont très encourageants.
- ◆ L'approche numérique choisie, MAR3D avec emboîtement (AGRIF) permet d'accéder à une description très détaillée des régimes hydrodynamiques dans des zones de l'ordre d'un hectare correspondant aux dimensions des anses dans lesquelles le GIPREB effectue son programme de suivi des zostères.
- ◆ Un programme de recherche inter-labos (M2P2, CEREGE et IRPHE) a été mis en place, dans le cadre du PO FEDER-PACA (en cours d'examen) pour réaliser une étude détaillée du rôle de la dynamique hydro-sédimentaire sur le développement des herbiers.
- ◆ Ce programme comporte :
 - des mesures in situ (y compris des photos aériennes par temps de vent, pour une meilleure compréhension du rôle des vagues de vent)
 - Une modélisation détaillée du transport sédimentaire 3D
 - Des expériences modèles en canal hydraulique (IRPHE)
- ◆ Il vise à fournir des outils d'aide à la décision aux gestionnaires des deux sites concernés: GIPREB (pour l'étang de Berre) et SIBOJAI (pour l'étang de Bolmon) pour la recolonisation des herbiers qui est un enjeu important dans le cadre des objectifs 2021 de la DCE.

MERCI pour votre attention

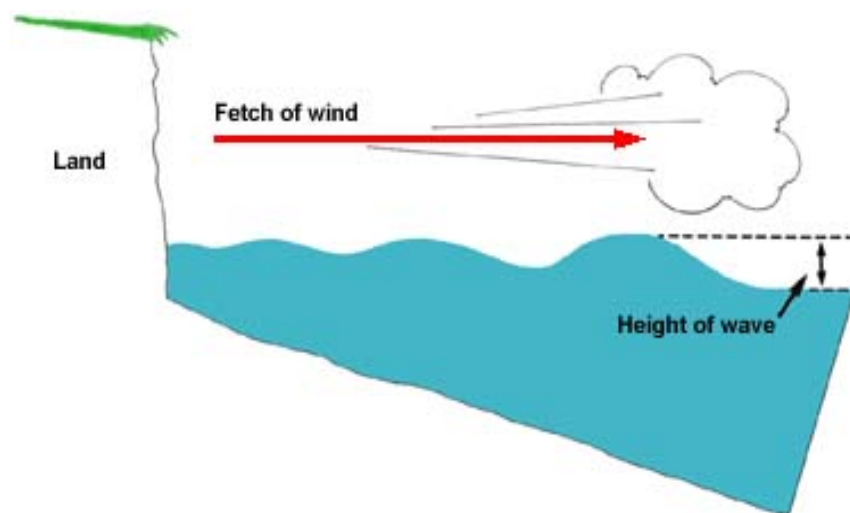


Rappels classiques: effet de brassage vertical par les vagues de vent



Mouvement orbital

- ◆ Le mouvement orbital diminue avec la profondeur
- ◆ La profondeur est approximativement égale à la demi-longueur d'onde de la vague: $D = L/2$; Ref. Garrison (2007)

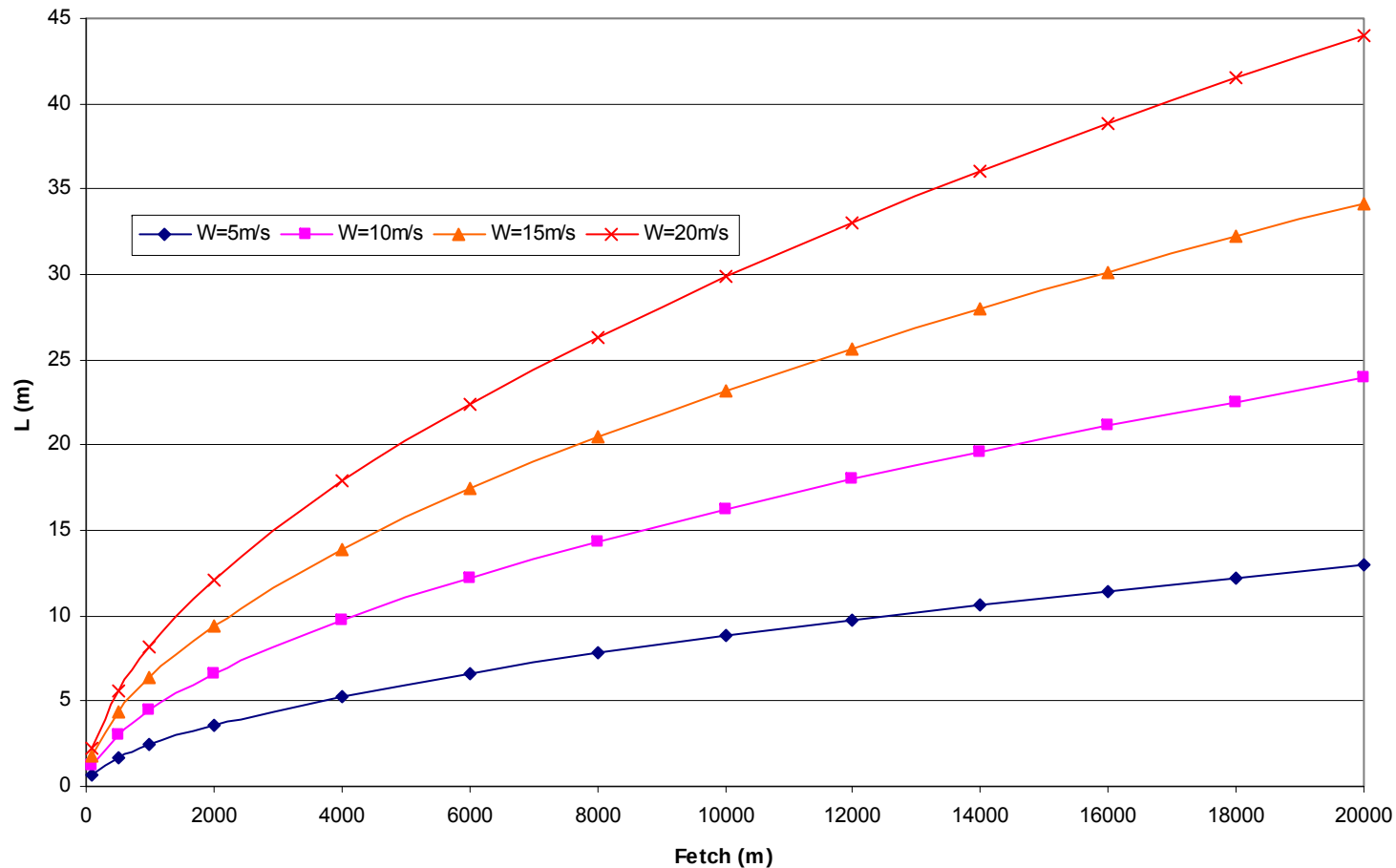


3 facteurs importants pour la formation des vagues de vent:

- vitesse du vent
- temps pendant lequel le vent souffle
- distance le long de la surface sur laquelle le vent souffle (=Fetch)

En bref, dans les parties de l'étang où la hauteur d'eau est inférieure à $L/2$, les vagues ont le potentiel de remettre en suspension les sédiments du fond.

Exemple d'estimation de longueur d'onde des vagues en fonction de la vitesse du vent et du fetch; loi approchée en eau profonde (Cyr, 1998)

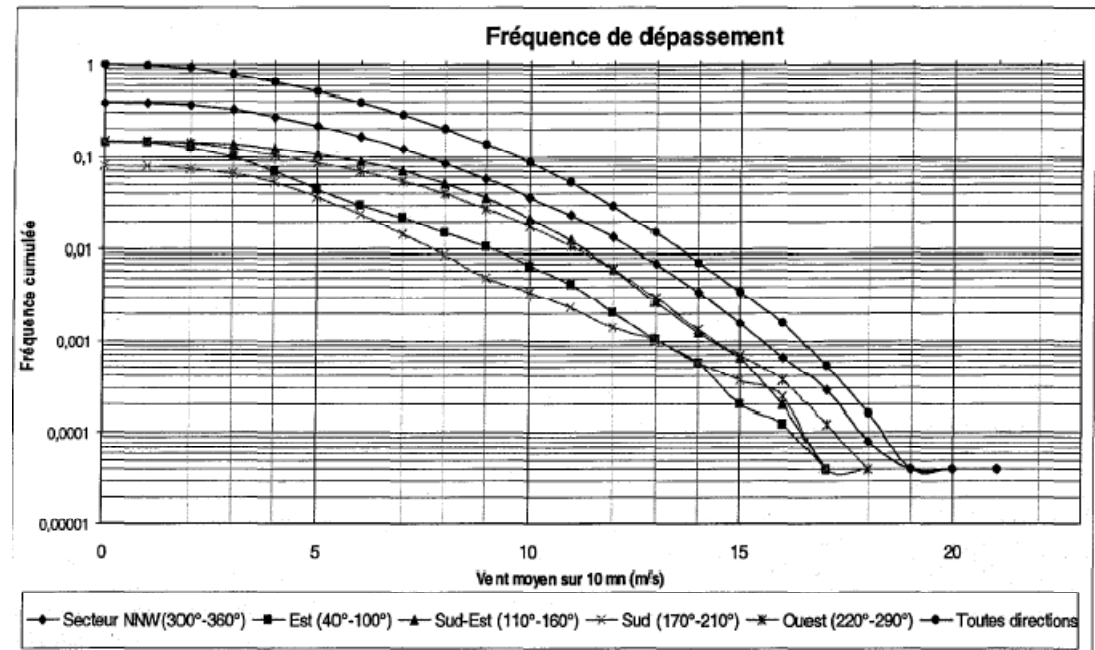
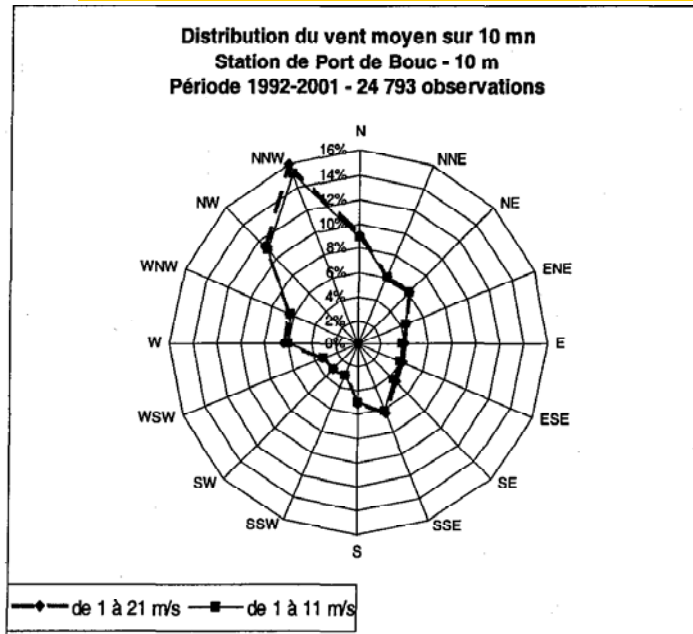


En eau profonde, la distance de mélange verticale est voisine de $L/2$.

En bordure de l'étang pour les faibles profondeurs ($h < L/8$), une correction doit être appliquée. Ce type de correction fera l'objet d'une étude théorique, et d'un recalage expérimental.

Roses des vents

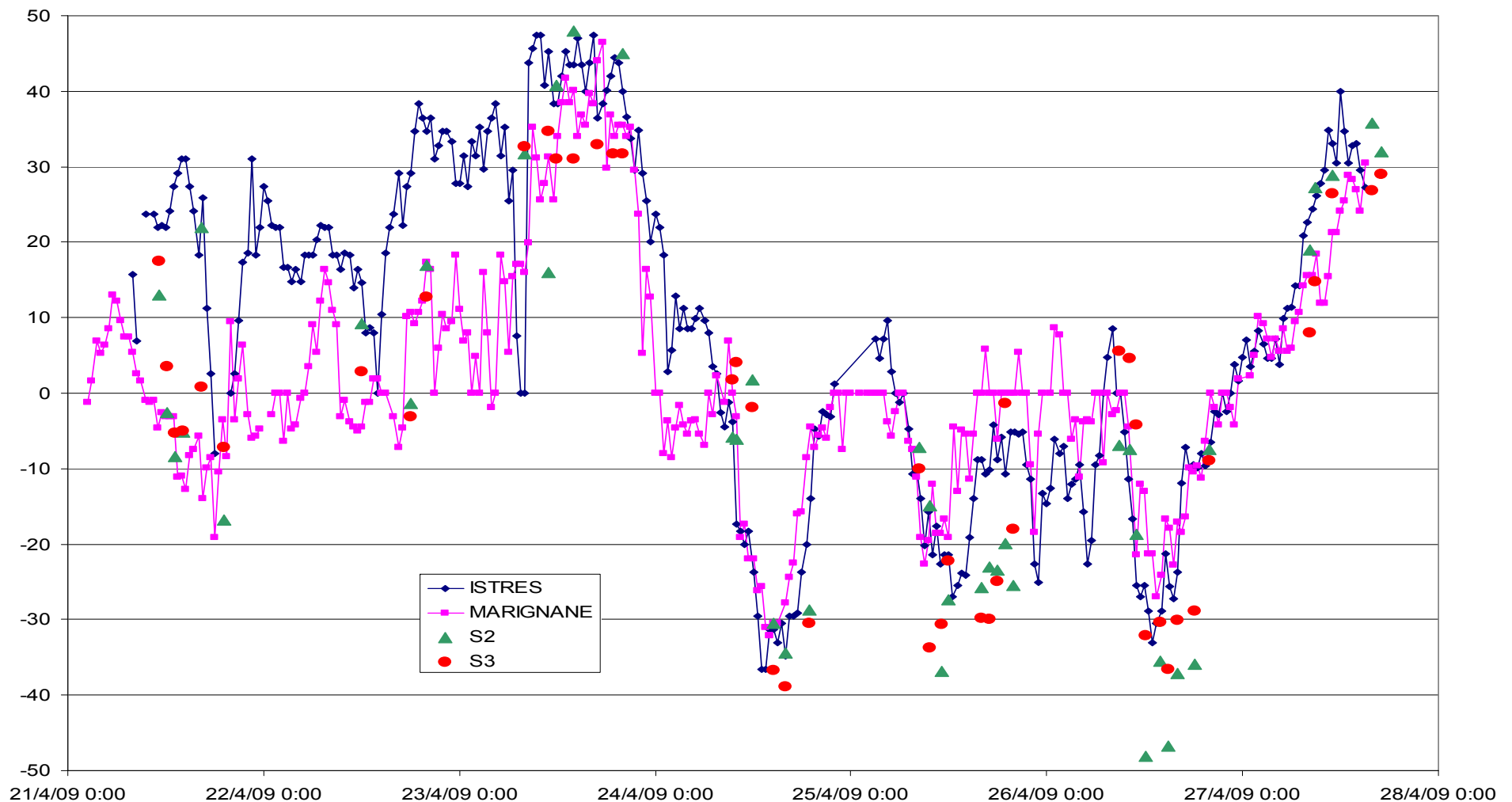
Fréquence et Direction des vents 1992-2001 (Port de Bouc ; rapport Sogreah)



Mois / vitesse (m/s)	Nombre de jours où le vent moyen (à 10 m) dépasse :				
	➤ 5 m/s (18 km/h)	>10 m/s (36 km/h)	➤ 15 m/s (54km/h)	➤ 20 m/s (72 km/h)	➤ 25 m/s (90 km/h)
janvier	24.3	8.3	0.7	0.0	0.0
mars	28.1	11.0	1.3	0.0	0.0
mai	28.5	7.1	0.5	0.0	0.0
juillet	30.0	7.1	0.3	0.0	0.0
septembre	26.0	7.0	0.1	0.0	0.0
novembre	26.0	7.0	0.8	0.2	0.0

Ces données montrent que le vent moyen est compris entre 5 et 10m/s de 24 à 26 jours/mois au cours de l'année. Elles seront actualisées à partir des relevés horaires fournis par Atmopaca, par le système METAR, et par les trois sondes EDF-IXsurvey.

Exemple d'hétérogénéité du vent sur l'étang de Berre (espace et temps)



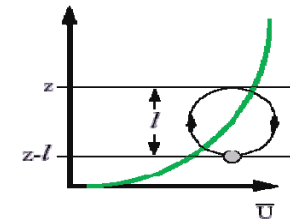
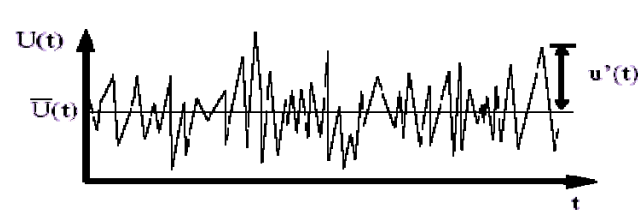
Le vent est rarement unidirectionnel sur Berre (cf. trois sondes EDF)

Des cartographies horaires 2D du vent à une hauteur de 10m sont accessibles sur le site [Atmopaca](#)

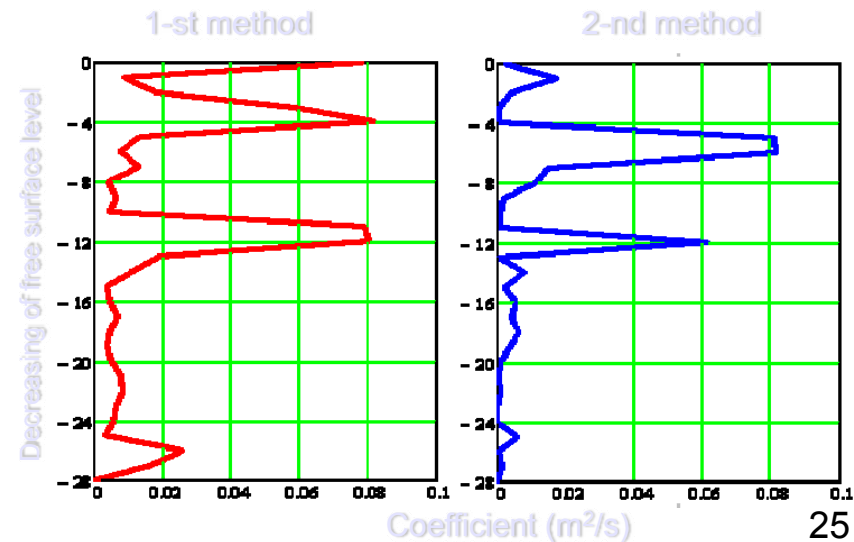
Numerical simulation of turbulent coefficient (two methods are considered)

$$U(t) = \bar{U} + u'(t)$$

1) method of Monin;



2) method of Belotserkovskii;



Distributions of the coefficient of vertical turbulent exchange

Parameterisation of Belotserkovskii was included as a module in Azov3d-model for calculation evolution of 3D currents in shallow water basins.

- Results of modeling were compared with results of measurements during expedition in the lagoon Etang de Berre in September 2006

